

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES

TESIS DOCTORAL

**Vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de excesos
hídricos superficiales en el noroeste de la provincia de Buenos
Aires, Argentina.**

Tesista: Mg. Ing. Fabio Alejandro Montealegre Medina

Directora: Dr. Mg. Ing. Fernanda Julia Gaspari

Tesis presentada para optar al título de
Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

La Plata, Argentina

2026

Dedicatoria

*Dedico este trabajo a mi familia, quienes con amor infinito
me apoyaron y me llenaron de aliento en el proceso.
Y con el alma llena de gratitud, a mi padre; este título es
el homenaje que rindo a tu vida y a la fe que siempre
tuviste en mi futuro. Gracias por tu ejemplo y enseñanzas.
Tu legado está en cada página de este desafío.*

RESUMEN

Las inundaciones constituyen uno de los fenómenos naturales de mayor impacto socioeconómico a nivel global, con grandes pérdidas económicas y ambientales en la región pampeana argentina. En cuencas de llanura, donde las pendientes extremadamente bajas y la densidad de drenaje reducida condicionan una dinámica hidrológica distintiva, la evaluación de la vulnerabilidad requiere aproximaciones metodológicas específicas que difieran de aquellas desarrolladas para cuencas con mayor relieve. La cuenca A1 del río Salado (delimitación hídrica nombrada en el Plan Maestro del Río Salado), ubicada en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, ejemplifica estas características particulares que, con una superficie de 17.737,63 km² distribuida en 15 partidos, presenta pendientes medias del 0,90%, densidad de drenaje de 0,03 km/km² y predominio de procesos de anegamiento. Estas condiciones generan alta vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de precipitación.

El objetivo general de esta tesis doctoral fue identificar y evaluar la vulnerabilidad hidrológica producida por la presencia de eventos extremos de exceso hídrico superficial en el noroeste bonaerense, mediante indicadores hidrológicos y ambientales.

Para alcanzarlo, se plantearon objetivos particulares orientados a caracterizar geográfica y ambientalmente la zona de estudio, estudiar las variables hidrometeorológicas para identificar eventos extremos, simular el comportamiento hidrológico mediante modelos matemáticos geoespaciales, analizar áreas de inundación por medio de información satelital, cuantificar y espacializar indicadores de vulnerabilidad hidrológica, y zonificar la vulnerabilidad para contribuir a la planificación territorial. La hipótesis de investigación sostuvo que la cuantificación de indicadores hidrológicos ambientales permite zonificar la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico en áreas de llanura.

La metodología integró múltiples aproximaciones complementarias. El análisis morfométrico, desarrollado mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) a partir de modelos digitales de elevación SRTM corregidos, permitió caracterizar en detalle a la cuenca y jerarquizar cinco subcuencas según su fragilidad morfométrica. Para la modelación hidrológica se desarrolló GeoQ, un complemento de código abierto para el software QGIS que implementa la metodología del Número de Curva del Soil Conservation Service (EEUU), permitiendo calcular y zonificar el coeficiente de escorrentía, la capacidad de infiltración y las abstracciones iniciales bajo diferentes condiciones de humedad antecedente. La dinámica del agua superficial fue caracterizada mediante la aplicación del indicador ODS 6.6.1, utilizando productos del Global Surface Water Explorer (GSWE) que integran 36 años de observaciones satelitales (1984-2020) de los programas Landsat y Sentinel. Finalmente, la zonificación de vulnerabilidad se realizó mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), integrando factores condicionantes (posición del terreno, coeficiente de escurrimiento, drenaje del suelo, limitantes edáficas), un factor desencadenante (intensidad de cambio de ocurrencia del agua) y un factor de evaluación (ocurrencia de agua superficial), con verificación de consistencia mediante el Índice de Saaty.

Los resultados de la zonificación clasificaron la cuenca A1 en cuatro categorías de vulnerabilidad hidrológica (ocupación en superficie areal y en porcentaje): muy alta (259,15 km², 1,46%), alta (3.066,61 km², 17,29%), media (2.747,15 km², 15,49%) y baja (11.664,72 km², 65,76%). Las áreas de muy alta vulnerabilidad se localizan en vías de escurrimiento con coeficientes de escorrentía superiores al 80%, drenaje pobre y ganancia máxima de agua superficial; las de alta vulnerabilidad

corresponden a planicies anegables susceptibles a inundación; mientras que las zonas de baja vulnerabilidad ocupan sectores topográficamente elevados con condiciones favorables para la infiltración. La validación del modelo mediante cruzamiento espacial con la extensión máxima de agua del GSWE demostró una correspondencia del 100% en la categoría de muy alta vulnerabilidad, donde la totalidad del área clasificada coincidió con zonas que registraron presencia de agua superficial durante el período 1984-2020. Este resultado, superior al 67% reportado en estudios similares de la región pampeana, confirma la capacidad del enfoque desarrollado para identificar las áreas efectivamente susceptibles a excesos hídricos en ambientes de llanura.

El análisis de productos GSWE reveló la alta variabilidad hidrológica que caracteriza a la cuenca, con incrementos de hasta 552% en la extensión de agua estacional entre años secos y húmedos, evidenciando una respuesta hidrológica altamente no lineal ante variaciones en las precipitaciones. El período 2012-2019 fue identificado como el de mayor extensión de agua superficial en 36 años de registro, correlacionado con precipitaciones superiores a la media histórica. Esta información, junto con los productos de recurrencia y estacionalidad, permitieron diferenciar zonas con riesgo predecible de anegamiento de aquellas donde el riesgo es episódico, información fundamental para el diseño de estrategias de gestión diferenciadas.

Las contribuciones metodológicas de esta investigación incluyen el desarrollo del complemento GeoQ, disponible en el repositorio oficial de QGis con más de 2.700 descargas, que constituye una herramienta potente de código abierto para análisis hidrológico espacial mediante el método del Número de Curva; la adaptación del AHP para ambientes de llanura, priorizando indicadores específicos como posición del terreno y coeficiente de escurrimiento sobre factores de relieve; y la integración del marco metodológico del ODS 6.6.1 en la evaluación de vulnerabilidad, vinculando la investigación con objetivos globales de desarrollo sostenible. Varios capítulos de esta tesis fueron publicados en revistas científicas indexadas y/o presentados en congresos nacionales e internacionales, otorgando validación adicional mediante procesos de revisión por pares.

Los resultados confirman la hipótesis de investigación, demostrando que la cuantificación de indicadores hidrológicos ambientales mediante técnicas de análisis multicriterio permite efectivamente zonificar la vulnerabilidad hidrológica en áreas de llanura. Los productos cartográficos generados constituyen herramientas técnicas de aplicación directa para la planificación territorial, la gestión del riesgo hidrológico y la toma de decisiones a nivel municipal y regional en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. La metodología desarrollada puede ser replicable en otras cuencas de la llanura pampeana con características similares, contribuyendo al conocimiento sobre la fragilidad de estos sistemas hidrológicos únicos y proporcionando bases científicas para estrategias de adaptación al cambio climático en ambientes donde se proyecta una intensificación del ciclo hidrológico.

Palabras clave: vulnerabilidad hidrológica, cuencas de llanura, excesos hídricos, análisis jerárquico multicriterio, teledetección satelital, planificación territorial, GeoQ.

ABSTRACT

Floods constitute one of the natural phenomena with the greatest socioeconomic impact globally, with significant economic and environmental losses in the Argentine Pampean region. In lowland basins, where extremely low slopes and reduced drainage density determine a distinctive hydrological dynamic, vulnerability assessment requires specific methodological approaches that differ from those developed for basins with greater relief. The A1 basin of the Salado River, located in the northwest of Buenos Aires province, exemplifies these particular characteristics: with an area of 17,737.63 km² distributed across 15 districts, it presents average slopes of 0.90%, drainage density of 0.03 km/km², and predominance of waterlogging processes. These conditions generate high hydrological vulnerability to extreme precipitation events.

The general objective of this doctoral thesis was to identify and evaluate the hydrological vulnerability produced by extreme surface water excess events in northwestern Buenos Aires. To achieve this, specific objectives were established aimed at: geographically and environmentally characterizing the study area, studying hydrometeorological variables to identify extreme events, simulating hydrological behavior through geospatial mathematical models, analyzing flood areas using satellite information, quantifying and spatializing hydrological vulnerability indicators, and zoning vulnerability to contribute to territorial planning. The research hypothesis maintained that the quantification of environmental hydrological indicators allows for the zoning of hydrological vulnerability to extreme water excess events in lowland areas.

The methodology integrated multiple complementary approaches. Morphometric analysis, developed using Geographic Information Systems (GIS) from corrected SRTM digital elevation models, allowed characterization of the basin and hierarchical ranking of five sub-basins according to their morphometric fragility. For hydrological modeling, GeoQ was developed, an open-source plugin for QGIS software that implements the Soil Conservation Service Curve Number methodology (USA), enabling calculation and zoning of runoff coefficient, infiltration capacity, and initial abstractions under different antecedent moisture conditions. Surface water dynamics were characterized through application of SDG indicator 6.6.1, using Global Surface Water Explorer (GSWE) products that integrate 36 years of satellite observations (1984-2020) from the Landsat and Sentinel programs. Finally, vulnerability zoning was performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP), integrating conditioning factors (terrain position, runoff coefficient, soil drainage, edaphic limitations), a triggering factor (intensity of water occurrence change), and an evaluation factor (surface water occurrence), with consistency verification using Saaty's index.

The zoning results classified the A1 basin into four hydrological vulnerability categories: very high (259.15 km², 1.46%), high (3,066.61 km², 17.29%), medium (2,747.15 km², 15.49%), and low (11,664.72 km², 65.76%). Very high vulnerability areas are located in runoff pathways with runoff coefficients exceeding 80%, poor drainage, and maximum surface water gain; high vulnerability areas correspond to flood-prone plains susceptible to inundation, while low vulnerability zones occupy topographically elevated sectors with favorable conditions for infiltration. Model validation through spatial crosschecking with the maximum water extent from GSWE demonstrated 100% correspondence in the very high vulnerability category, where the entire classified area coincided with zones that recorded surface water presence during the 1984-2020 period. This result, superior to the 67% reported in similar studies of the Pampean region, confirms the capacity of the developed approach to identify areas effectively susceptible to excess water in lowland environments.

Analysis of GSWE products revealed the high hydrological variability characterizing the basin, with increases of up to 552% in seasonal water extent between dry and wet years, evidencing a highly non-

linear hydrological response to precipitation variations. The 2012-2019 period was identified as having the greatest surface water extent in 36 years of records, correlated with precipitation above the historical average. This information, together with recurrence and seasonality products, allows differentiation of zones with predictable waterlogging risk from those where risk is episodic, fundamental information for designing differentiated management strategies.

The methodological contributions of this research include the development of the GeoQ plugin, available in the official QGIS repository with over 2,700 downloads, which constitutes a powerful open-source tool for spatial hydrological analysis using the Curve Number method; the adaptation of AHP for lowland environments, prioritizing specific indicators such as terrain position and runoff coefficient over relief factors; and the integration of the SDG 6.6.1 methodological framework into vulnerability assessment, linking the research with global sustainable development goals. Several chapters of this thesis were published in indexed scientific journals and presented at national and international conferences, providing additional validation through peer review processes.

The results confirm the research hypothesis, demonstrating that quantification of environmental hydrological indicators through multi-criteria analysis techniques effectively allows for zoning of hydrological vulnerability in lowland areas. The generated cartographic products constitute technical tools for direct application in territorial planning, hydrological risk management, and decision-making at municipal and regional levels in northwestern Buenos Aires province. The developed methodology is replicable in other basins of the Pampean plain with similar characteristics, contributing to knowledge about the fragility of these unique hydrological systems and providing scientific bases for climate change adaptation strategies in environments where intensification of the hydrological cycle is projected.

Keywords: hydrological vulnerability, lowland basins, water excess, multi-criteria hierarchical analysis, satellite remote sensing, territorial planning, GeoQ.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Fundamentación de la elección del tema.....	1
1.2 Necesidad de enfoques integrados y herramientas de gestión geoespacial.....	4
1.3 Marco conceptual.....	5
1.3.1 Ciclo hidrológico.....	5
1.3.2 Cuenca hidrográfica.....	6
1.3.3 Plan Maestro de la cuenca del Río Salado de la provincia de Buenos Aires	9
1.3.4 Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.6.1.....	11
1.3.5 Herramientas geográficas.....	12
1.3.6 Vulnerabilidad hidrológica	15
1.4 Objetivos e Hipótesis	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.4.3 Hipótesis.....	18
1.5 Estructura metodológica de la tesis.....	19
1.6 Bibliografía.....	23
2 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN: CORRECCIONES ALTIMÉTRICAS PARA USO HIDROLÓGICO EN ÁREAS DE LLANURA	31
2.1 Introducción.....	31
2.2 Materiales y métodos.....	32
2.2.1 Cartografía base antecedente: El MDE e hidrografía	33
2.2.2 Corrección altimétrica.	34
2.3 Resultados y discusión.....	36
2.3.1 Cartografía base antecedente: el MDE y el sistema de drenaje.....	36
2.3.2 Corrección altimétrica.	37
2.4 Conclusiones.....	41
2.5 Bibliografía.....	41

3	MORFOMETRÍA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	44
3.1	Introducción.....	44
3.2	Metodología	45
3.2.1	Parámetros de forma.....	46
3.2.2	Parámetros de relieve	47
3.2.3	Parámetros de la red de drenaje	48
3.2.4	Priorización de la fragilidad morfométrica de la cuenca A1.....	49
3.3	Resultados y discusión	51
3.3.1	Caracterización morfométrica integral de la cuenca A1	51
3.3.2	Caracterización y análisis morfométrico a nivel de subcuenca	53
3.3.3	Priorización morfométrica.....	64
3.3.4	Análisis espacial de la fragilidad morfométrica.....	67
3.3.5	Particularidades morfométricas de ambientes de llanura	69
3.3.6	Morfología de cuenca y respuesta hidrológica	70
3.3.7	Heterogeneidad morfométrica a escala de subcuenca.....	71
3.4	Conclusiones.....	72
3.5	Bibliografía.....	74
4	CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA Y AMBIENTAL	80
4.1	Distribución político - administrativa.....	81
4.2	Centros poblados.....	83
4.3	Sistema vial y de transporte	85
4.4	Descripción climática	87
4.5	Relación de la posición del suelo y cuerpos de agua en la zona de estudio.....	89
4.5.1	Posición del suelo.....	90
4.5.2	Tipo drenaje	94
4.6	Suelos.....	97
4.6.1	Zonificación edáfica.....	98
4.6.2	Limitantes principales del suelo	101
4.6.3	Textura	105
4.6.4	Grupo hidrológico	107
4.7	Cobertura vegetal del suelo.....	109
4.8	Uso del suelo	112
4.9	Ecorregiones	114
4.10	Bibliografía.....	119
5	ANÁLISIS MULTITEMPORAL PLUVIAL Y DE ZONAS INUNDABLES EN EL NOROESTE BONAERENSE. ARGENTINA.	123

5.1	Introducción.....	123
5.2	Materiales y métodos.....	125
5.3	Resultados y discusión.....	127
5.4	Conclusiones.....	132
5.5	Bibliografía.....	134
6	MONITOREO POR TELEDETECCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS	136
6.1	Introducción.....	136
6.2	Materiales y métodos.....	137
6.3	Resultados y discusión.....	139
6.4	Conclusiones.....	145
6.5	Bibliografía.....	146
7	OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE 6.6.1.	148
7.1	Introducción.....	148
7.2	Metodología	149
7.3	Resultados y discusión.....	152
7.3.1	Ocurrencia de agua	152
7.3.2	Cambio en la intensidad de ocurrencia.....	153
7.3.3	Estacionalidad del agua.....	154
7.3.4	Recurrencia del agua	156
7.3.5	Transición del agua.....	157
7.3.6	Extensión máxima de agua.....	159
7.3.7	Relación entre precipitación y extensión de agua superficial.....	161
7.3.8	Análisis comparativo de períodos extremos: sequía <i>versus</i> excesos hídricos.....	163
7.4	Conclusiones.....	165
7.5	Bibliografía.....	167
8	EVALUACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS APLICANDO UN MODELO AUTOMATIZADO CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GEOQ), PARA UNA CUENCA DE LLANURA BONAERENSE, ARGENTINA.	169
8.1	Introducción.....	169
8.2	Materiales y métodos.....	169
8.2.1	Caracterización Edáfico-vegetal	170
8.2.2	Caracterización hidro-meteorológica	170
8.2.3	Herramienta espacial GeoQ	171
8.3	Resultados y discusión.....	172
8.4	Conclusiones.....	174

8.5	Bibliografía.....	175
9	EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS VULNERABLES POR EXCESOS HÍDRICOS EN NOROESTE BONAERENSE. ARGENTINA.....	177
9.1	Introducción.....	177
9.2	Materiales y Métodos.....	178
9.2.1	Identificación y cuantificación de descriptores.....	179
9.2.2	Zonificación de áreas de vulnerabilidad por excesos hídricos	187
9.3	Resultados y discusión.....	188
9.3.1	Priorización de variables	188
9.3.2	Zonificación de VH con geoprocesamiento	192
9.3.3	Validación del modelo geoespacial para la VH.....	195
9.4	Conclusiones.....	197
9.5	Bibliografía.....	198
10	CONCLUSIÓN.....	202
10.1	Contribuciones originales de la investigación	205
10.2	Aportes para la planificación territorial.....	207
10.3	Propuestas de futuras línea de investigación	207
10.4	Bibliografía.....	207
11	AGRADECIMIENTOS	209
12	ANEXOS	210
A.	Anexo Capítulo 7. Tabla de ocupación de superficies de GSWE anual <i>versus</i> Precipitación total anual del SMN.....	210
B.	Anexo Capítulo 7. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO Contribución al avance en la prevención del riesgo hidrológico en el partido de Junín	212
B.1.	Introducción.....	212
B.2.	Materiales y métodos.....	212
B.2.1.	Levantamiento GPS cinemático sobre caminos rurales	213
B.2.2.	Productos satelitales del Global Surface Water Explorer.....	214
B.2.3.	Integración de información GPS y productos GSWE.....	215
B.3.	Resultados y discusión.....	216
B.4.	Conclusiones.....	224
B.5.	Bibliografía.....	225
C.	Anexo Capítulo 8. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO. GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®.	227
C.1.	Introducción.....	227
C.2.	Materiales y métodos.....	228
C.2.1.	Construcción y procesamiento de GeoQ	230

C.2.2.	Estudios de caso para aplicación de GeoQ	232
C.3.	Resultados y discusión.....	234
C.4.	Conclusiones	239
C.5.	Bibliografía	240
D.	Anexo Capítulo 9. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO. Zonificación de la susceptibilidad a la inundación del noroeste bonaerense	243
D.1.	Introducción.....	243
D.2.	Metodología	244
D.3.	Resultados y discusión	244
D.4.	Conclusiones.....	252
D.5.	Bibliografía	253
E.	Anexo Capítulo 9. Matrices de la metodología de AHP	256
E.1.	Cálculo para los factores condicionantes	256
E.1.1.	Matriz de comparación de pares	256
E.1.2.	Matriz de normalización	256
E.1.3.	Cálculo del vector suma ponderada.....	257
E.2.	Cálculo para los descriptores de los todos los factores	257
E.2.1.	Matrices de comparación de pares.....	257
E.2.2.	Matrices de normalización.....	259
E.2.3.	Cálculo del vector suma ponderada.....	260

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros morfométricos de forma a nivel de cuenca hidrográfica. Fuente: Guzmán et al. (2021).	47
Tabla 3.2. Parámetros de relieve a nivel de cuenca. Fuente: Guzmán et al. (2021).	47
Tabla 3.3. Parámetros de drenaje a nivel de cuenca. Fuente: Guzmán et al. (2021).	49
Tabla 3.4. Parámetros morfométricos para la Cuenca A1.	51
Tabla 3.5. Resultados de los parámetros morfométricos de forma por subcuenca.	57
Tabla 3.6. Resultados de los parámetros morfométricos de relieve por subcuenca.	58
Tabla 3.7. Resultados de los parámetros morfométricos de drenaje por subcuenca.	63
Tabla 3.8. Valores de parámetros morfométricos que intervienen en el cálculo de los valores parámetro compuesto para morfometría (PCM) y priorización de subcuencas.	64
Tabla 3.9. Umbrales de clasificación y categorización de subcuencas.	65
Tabla 4.1. Superficie de ocupación de los departamentos provinciales en las subcuencas.	82
Tabla 4.2. Porcentaje de ocupación en superficie según posición del terreno a nivel de subcuenca.	93
Tabla 4.3. Superficie de tipos de cuerpos de agua en la cuenca A1.	97
Tabla 4.4. Clasificación de suelos presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	98
Tabla 4.5. Superficie de ocupación del Subgrupo de suelos en el área de estudio.	101
Tabla 4.6. Porcentaje de ocupación por limitante principal de suelos de las subcuencas.	103
Tabla 4.7. Superficie ocupada por las limitantes principales, secundarias y terciarias en el área de estudio.	105
Tabla 4.8. Superficie de texturas de suelos de las subcuencas del área de estudio.	107
Tabla 4.9. Ocupación en superficie (%) por grupo hidrológico a nivel de subcuenca.	108
Tabla 4.10. Superficie de ocupación porcentual de las clases de cobertura por subcuenca.	112
Tabla 4.11. Superficie de ocupación de uso de suelo por subcuenca.	114
Tabla 4.12. Superficie de las ecorregiones presentes en el área de estudio.	116
Tabla 5.1. Área inundada por mes de los años 2012 y 2015.	131
Tabla 6.1. Datos de precipitación mensual del año 2017. Fuente: SMN.	138
Tabla 6.2. Balance hídrico por localidad, en período húmedo, por Modelo HidroBio (Año 2017).	140
Tabla 7.1. Precipitación anual y cobertura de agua superficial en la cuenca A1 (años 2009 y 2017).	164
Tabla 8.1. Código de las coberturas y uso del suelo para la cuenca A1.	170
Tabla 8.2. Superficie de ocupación según Grupo Hidrológico y Cobertura y uso del Suelo en la cuenca A1.	173
Tabla 8.3. Valores de precipitación modal por cuartiles para las estaciones pertenecientes a la cuenca A1.	173
Tabla 8.4. Rangos de CE para los Escenarios de escorrentía.	174
Tabla 9.1. Descriptor de clases de posición del terreno según ambiente integrando el suelo y vegetación en A1.	181
Tabla 9.2. Escala de valoración propuesta por Saaty (1980). Fuente: Adaptado de Vázquez Catalán (2016).	185
Tabla 9.3. Ejemplo de matriz de descriptores para un factor.	185
Tabla 9.4. Matriz de normalización y vector de priorización para un factor y sus descriptores.	186
Tabla 9.5. Índice Aleatorio (IA). Fuente: Aguarón y Moreno - Jiménez (2003).	186
Tabla 9.6. Resumen de priorización metodológica por AHP de los factores y descriptores de la A1.	189
Tabla 9.7. Escalamiento de los descriptores por factor y valor VH (Vulnerabilidad Hidrológica).	191
Tabla 9.8. Rangos para la clasificación de vulnerabilidad hidrológica.	192
Tabla 9.9. Validación de la vulnerabilidad hidrológica mediante cruzamiento con la extensión máxima de agua del GSWE.	196
Tabla A. 1. Total superficie de extensión máxima de agua GSWE y acumulado de precipitación anual de estaciones del SMN, por los años 1984 – 2020.	210
Tabla B. 1. Jerarquización de vulnerabilidad y transitabilidad vial según productos GSWE y criterios de gestión municipal.	223
Tabla C. 1. Códigos de vegetación y/o uso del suelo asignados al mapa vegetación y su correspondiente NC según GH en CHA II. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).	233

<i>Tabla D. 1. Cruce de rangos de susceptibilidad para la cobertura de la tierra y los limitantes principales.....</i>	<i>249</i>
<i>Tabla D. 2. Áreas susceptibles de inundación por subcuencas.....</i>	<i>251</i>
<i>Tabla E. 1. Matriz de comparación de pares para los factores condicionantes.</i>	<i>256</i>
<i>Tabla E. 2. Matriz de normalización para los factores condicionantes.</i>	<i>256</i>
<i>Tabla E. 3. Vector suma ponderada para los factores condicionantes.....</i>	<i>257</i>
<i>Tabla E. 4. Matriz de comparación de pares para el factor Posición del Terreno.....</i>	<i>257</i>
<i>Tabla E. 5. Matriz de comparación de pares para el factor Coeficiente de Escurrimiento.....</i>	<i>258</i>
<i>Tabla E. 6. Matriz de comparación de pares para el factor Drenaje.....</i>	<i>258</i>
<i>Tabla E. 7. Matriz de comparación de pares para el factor Limitantes Principales.....</i>	<i>258</i>
<i>Tabla E. 8. Matriz de comparación de pares para el factor Intensidad de Cambio de Ocurrencia.</i>	<i>258</i>
<i>Tabla E. 9. Matriz de comparación de pares para el factor Ocurrencia.</i>	<i>259</i>
<i>Tabla E. 10. Matriz de normalización para el factor Posición del Terreno.</i>	<i>259</i>
<i>Tabla E. 11. Matriz de normalización para el factor Coeficiente de Escurrimiento.....</i>	<i>259</i>
<i>Tabla E. 12. Matriz de normalización para el factor Drenaje.....</i>	<i>259</i>
<i>Tabla E. 13. Matriz de normalización para el factor Limitantes Principales.</i>	<i>260</i>
<i>Tabla E. 14. Matriz de normalización para el factor Intensidad de Cambio de Ocurrencia.</i>	<i>260</i>
<i>Tabla E. 15. Matriz de normalización para el factor Ocurrencia.....</i>	<i>260</i>
<i>Tabla E. 16. Vector suma ponderada para el factor Posición del Terreno.....</i>	<i>260</i>
<i>Tabla E. 17. Vector suma ponderada para el factor Coeficiente de Escurrimiento.</i>	<i>261</i>
<i>Tabla E. 18. Vector suma ponderada para el factor Drenaje.</i>	<i>261</i>
<i>Tabla E. 19. Vector suma ponderada para el factor Limitantes Principales.....</i>	<i>261</i>
<i>Tabla E. 20. Vector suma ponderada para el factor Intensidad de cambio de ocurrencia.....</i>	<i>261</i>
<i>Tabla E. 21. Vector suma ponderada para el factor Ocurrencia.</i>	<i>261</i>
<i>Tabla E. 22. Resumen de valores del campo Vector Suma Ponderada / Vector Priorización para la obtención del RC para los descriptores de cada factor.....</i>	<i>262</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Subregiones de la cuenca del Río Salado. Provincia de Buenos Aires. Plan Maestro del Río Salado. Fuente: (MOSP, 1999).	9
Figura 1.2 Metodología para zonificar la vulnerabilidad hidrológica en una cuenca.	22
Figura 2.1 Ubicación de la subregión A1 según PMRS y la cuenca del Río Salado completa, en Argentina.	33
Figura 2.2 Ubicación de la subregión A1 según PMRS y sistema de drenaje superficial del IGN. Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2017).	36
Figura 2.3 Distribución de los puntos de nivelación IGN y corrección altimétrica. Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2017).	37
Figura 2.4 Modelo digital de elevación con la delimitación corregida de la cuenca A1 y su sistema de drenaje.	38
Figura 2.5 Distribución temporal de lagunas en la cuenca A1 corregida. Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2017).	39
Figura 2.6 Distribución y ocupación espacio-temporal de la laguna La Salada según DFO y dos situaciones extremas: A inundación, B sequía. Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2017).	40
Figura 3.1 MDE corregido por subcuencas de la A1.	54
Figura 3.2 Perfiles longitudinales de la longitud axial de cada subcuenca.	59
Figura 3.3 Red y orden de drenaje de la cuenca A1.	61
Figura 3.4 Nivel de priorización morfométrica de las subcuencas de la A1.	68
Figura 4.1. Ubicación de la cuenca A1. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).	80
Figura 4.2 Distribución de los departamentos en las subcuencas. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).	83
Figura 4.3 Distribución de los centros poblados en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).	84
Figura 4.4 Población por provincia, departamento y localidad en la cuenca A1.	85
Figura 4.5 Detalle de la infraestructura de transporte en las subcuencas. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).	86
Figura 4.6 Distribución de la precipitación media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).	87
Figura 4.7 Distribución de la temperatura media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).	88
Figura 4.8 Distribución de la evapotranspiración potencial media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).	89
Figura 4.9 Detalle de posición del terreno en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	92
Figura 4.10 Superficie porcentual de ocupación por posición del suelo en la cuenca A1.	93
Figura 4.11 Zonificación de los tipos de drenaje del suelo en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	95
Figura 4.12 Tipos de drenaje del suelo en las subcuencas.	96
Figura 4.13 Detalle de tipos de cuerpos de agua. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).	96
Figura 4.14 Zonificación de Subgrupo de suelos del área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	100
Figura 4.15 Limitantes principales presentes en el área de estudio Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	102
Figura 4.16 Limitantes secundarias presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	104
Figura 4.17 Limitantes terciarias presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	104
Figura 4.18 Texturas de suelo presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).	106
Figura 4.19 Detalle de los grupos hidrológicos presentes en las subcuencas.	108
Figura 4.20 Coberturas de Tierra según clasificación LCCS. Fuente: Adaptado de Jansen y Di Gregorio (2000).	111
Figura 4.21 Zonificación del uso del suelo del área de estudio. Fuente: Adaptado de Volante (2009).	114
Figura 4.22 Ecorregiones presentes en la cuenca A1 del Río Salado. Fuente: Adaptado de Pereyra (2003).	119
Figura 5.1 Modelización de procesos (MB) en ArcGIS 10®.	126
Figura 5.2 Precipitación mensual del período 2011-2015.	127
Figura 5.3 Frecuencias de presencia diaria de agua, según el análisis con datos de DFO.	128
Figura 5.4 Frecuencias de presencia diaria de agua para 2012, según el análisis con datos de DFO en la cuenca A1.	129
Figura 5.5 Frecuencias de presencia diaria de agua para 2015, según el análisis con datos de DFO en la cuenca A1.	130

Figura 5.6 Comparación espacio-temporal de escenarios hidrológicos extremos.....	132
Figura 6.1. Mapa de localización del área de estudio y estaciones meteorológicas del SMN analizadas.	138
Figura 6.2. Diagrama de balance hídrico de Thornthwaite y Mather (Año 2017). Localidad: a. Junín; b. Laboulaye; c. Venado Tuerto. Fuente: HidroBio (Cámara Artigas et al., 2012).	140
Figura 6.3. Precipitación acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.....	141
Figura 6.4. Evapotranspiración acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.	142
Figura 6.5. Escorrentía acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.	142
Figura 6.6. TWS mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.	143
Figura 6.7. Zonificación en valores acumulados (mm) de cada variable del balance hídrico en el periodo húmedo (Enero a Abril) de 2017. a) Precipitación (P), b) Evapotranspiración (E), c) Escorrentía (R), d) Almacenamiento de agua terrestre (TWS).	144
Figura 6.8. Balance hídrico geoespacial para el período enero-abril de 2017 (mm) en la cuenca A1.	144
Figura 7.1 Mapa de ocurrencia de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	152
Figura 7.2 Mapa de cambio en la intensidad de ocurrencia de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de datos GSWE.	153
Figura 7.3 Mapa de estacionalidad del agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	155
Figura 7.4 Mapa de recurrencia del agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	157
Figura 7.5 Mapa de transición del agua en la cuenca A1 (comparación 1984 versus 2020). Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	158
Figura 7.6 Mapa de extensión máxima de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	160
Figura 7.7 Series temporales de superficie de ocupación (km ²) según categoría de agua en la cuenca A1 (1986-2020).....	163
Figura 7.8 Comparación de la extensión de agua superficial entre el año 2009 (sequía) y 2017 (excesos hídricos extremos) en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.	163
Figura 8.1. Distribución de la Cobertura y Uso del suelo (a), Grupos Hidrológicos (b) y Numero de Curva (c) en la cuenca A1.	170
Figura 8.2. Interfaz gráfica del completo GeoQ en QGis ® 3.18.....	172
Figura 8.3. Especialización del Coeficiente de Escorrentía en la cuenca A1 para los 3 escenarios.	174
Figura 9.1. Metodología para la definición de áreas de vulnerabilidad hidrológica.	180
Figura 9.2. Factores y descriptores para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica en A1.....	184
Figura 9.3. Variables descriptivas según priorización para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica en A1.	190
Figura 9.4. Zonificación de la vulnerabilidad hidrológica en la cuenca 1.....	194
Figura 9.5. Cruzamiento de la vulnerabilidad hidrológica y la extensión máxima de agua del GSWE (1984-2020) en la cuenca A1.....	196
Figura B. 1. Trabajo de campo para levantamiento GPS. Fuente: Equipo de Geodesia de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.	214
Figura B. 2. Evolución temporal del modelo de elevaciones en el área de estudio. Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2018).	216
Figura B. 3. Mapa de ubicación del área de estudio y puntos GPS sobre la red vial.....	218
Figura B. 4. Extensión máxima de agua (1984-2020) superpuesta con puntos GPS y red vial.	219
Figura B. 5. Recurrencia del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.	220
Figura B. 6. Estacionalidad del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.	221
Figura B. 7. Transición del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.	222
Figura C. 1. Distribución geográfica de las cuencas hidrográficas testigo para la aplicación de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).....	230
Figura C. 2. Entorno gráfico de la modelación espacial de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).	231

<i>Figura C. 3. Interfaz gráfica del modelo cartográfico de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	232
<i>Figura C. 4. Base de datos cartográfica de las cuencas en estudio. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	234
<i>Figura C. 5. Cl_0 de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	235
<i>Figura C. 6. CE de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	236
<i>Figura C. 7. CF de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	237
<i>Figura C. 8. Representación de CE, CF, Cl_0 en los NC de estudio para una tormenta de 80,1 mm. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).</i>	238
 <i>Figura D. 1. Coberturas de Tierra según clasificación LCCS. FAO 2005. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).</i>	246
<i>Figura D. 2. Limitantes principales presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).</i>	248
<i>Figura D. 3. Mapa de rangos de susceptibilidad de inundación de la cuenca A1. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).</i>	250

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 2.1</i>	34
<i>Ecuación 2.2</i>	34
<i>Ecuación 5.1</i>	126
<i>Ecuación 6.1</i>	139
<i>Ecuación 8.1</i>	172
<i>Ecuación 9.1</i>	186
<i>Ecuación 9.2</i>	187
<i>Ecuación 9.3</i>	191
<i>Ecuación C. 1</i>	229
<i>Ecuación C. 2</i>	229
<i>Ecuación C. 3</i>	229
<i>Ecuación C. 4</i>	229
<i>Ecuación C. 5</i>	229

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Fundamentación de la elección del tema.

Los sucesos extremos en climatología e hidrología constituyen un importante factor de riesgo para la actividad humana, y en ocasiones llegan a convertirse en catástrofes. Por ello, es relevante considerar la ocurrencia de eventos extremos en el diseño y planificación del territorio (Beguería Portugués, 2002), al igual que en la estimación de variables hidrológicas asociadas que permitan evaluar dichos procesos extremos (inundaciones, sequías, desertificación). Estos últimos son temas de primer orden en la gestión y administración del territorio, cuya inclusión en la agenda política conducen a la toma de decisiones inteligentes sobre un espacio determinado (Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires, 1999).

De igual manera, como se menciona en el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014b), es necesario plantear una metodología que indique la vulnerabilidad de dichos ecosistemas, y, una forma de hacerlo es por medio de indicadores, entendiendo que un índice de vulnerabilidad generalmente se deriva de la combinación de varios indicadores que se supone que la representan (Cárdenas & Tobón, 2016).

La definición más conocida de vulnerabilidad se menciona en IPCC (2014a), donde expone que es la propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación. Diferentes autores han concluido que el término “vulnerabilidad” solo debe usarse con respecto a una situación vulnerable en particular, es decir, la vulnerabilidad debe ser evaluada frente a una amenaza o un rango de amenazas determinadas, y haciendo la distinción entre la vulnerabilidad actual y la futura (Cárdenas & Tobón, 2016).

De igual forma es necesario considerar o tener en cuenta distintos tipos de vulnerabilidad, debido a que pueden estar interconectados entre sí, pudiendo destacar que estas divisiones son solo diferentes perspectivas que permiten evaluar la vulnerabilidad como un fenómeno global y entre estas están: vulnerabilidad ambiental y ecológica, física, económica, social, cultural e ideológica, política e institucional, científica y tecnológica (Caceres Callo & Ataucuri Enriquez, 2018).

La vulnerabilidad hidrológica se refiere a la susceptibilidad de un sistema hidrológico ante eventos extremos y cambios ambientales, considerando su capacidad de respuesta y recuperación. La cuantificación de la vulnerabilidad hidrológica requiere identificar y jerarquizar variables de mayor impacto mediante la integración de factores morfométricos, geohidrológicos y antrópicos, considerando así tanto los parámetros hidrológicos y condiciones geográficas como las características socioeconómicas en una región. Está determinada por la interacción entre la exposición a amenazas hidrometeorológicas, la sensibilidad del sistema y la capacidad adaptativa de la sociedad, integrando así factores biofísicos (parámetros hidrológicos y condiciones geográficas) con características socioeconómicas (IPCC, 2014a).

Díaz Gómez (2015) expresa que la cuantificación de la vulnerabilidad hidrológica de las cuencas subtropicales ha permitido explorar y diseñar metodologías de trabajo de campo y gabinete que facultan identificar y jerarquizar las variables de mayor impacto ante eventos hidrológicos extremos. Además indica que la falta de conocimiento de los requerimientos hídricos de los ecosistemas (caudales ecológicos), el aumento de la demanda hídrica por crecimiento poblacional y expansión de agronegocios afectan a la sustentabilidad y dinámica de los ecosistemas.

La dinámica hídrica temporal y espacial de una cuenca hidrográfica es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación y está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas. La combinación de factores antrópicos y ambientales, en conjunción con las características morfométricas de las cuencas hidrográficas, pueden generar vulnerabilidad en el ambiente (Gaspari *et al.*, 2010). La representación del movimiento del agua sobre el terreno hacia los cauces se genera a partir de la aplicación de modelos cartográficos con mapas topográficos en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algunos modelos hidrológicos e hidráulicos (Díaz Gómez *et al.*, 2017).

La realización de mapas de vulnerabilidad contribuye a delimitar zonas según su grado de exposición a los peligros o amenazas latentes, los cuales ayudan a la planificación y ejecución de futuros trabajos u obras de protección y prevención. Estos se basan en las características naturales del terreno, tales como: topografía, geología, presencia de fallas geológicas activas y condiciones geomecánicas, considerando también, las características hídricas del área mapeada, como: presencia de cursos de agua, presencia de lagos, zonas de recarga de acuíferos y zonas costeras bajas (Caceres Callo & Ataucuri Enriquez, 2018).

La propuesta de investigación en la presente tesis es estudiar la vulnerabilidad hidrológica de las cuencas del noroeste bonaerense ante eventos hidrológicos extremos de exceso hídrico. Se considero como área de estudio a la subregión denominada A1 por el Plan Maestro del Río Salado, cuyo limite está restringido únicamente al límite de la provincia de Buenos Aires, Argentina, el cual fue redefinido hidrológicamente con el desarrollo de este trabajo.

La región pampeana argentina, y específicamente la cuenca bonaerense del río Salado, representa uno de los sistemas hidrológicos más complejos y vulnerables de Sudamérica ante eventos extremos de excesos hídricos. Esta cuenca, que abarca aproximadamente 170.000 km² y afecta a 1,4 millones de personas distribuidas en 59 municipios, constituyendo la columna vertebral de la economía agropecuaria nacional, y contribuyendo fuertemente a la producción de granos y ganado del país (MOSP, 1999; Banco Mundial, 2021).

La problemática de las inundaciones en esta región ha alcanzado dimensiones críticas en las últimas décadas. Según estimaciones del Banco Mundial (2021), las pérdidas económicas anuales por inundaciones en Argentina oscilan entre US\$ 500 millones y US\$ 1.400 millones, pudiendo incrementarse en un 125% como consecuencia del cambio climático. Específicamente en la provincia de Buenos Aires, la crisis de inundación en la actualidad (2024-2025) documentó aproximadamente 6 millones de hectáreas afectadas, con pérdidas económicas estimadas en US\$ 2,000 millones (Confederación de Asociaciones Rurales de Buenos Aires y La Pampa, 2025)¹.

El área de estudio de esta tesis se encuentra definida en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, cuya región está constituida por llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (MOSP, 1999). Esta zona presenta aspectos particulares, siendo esta una llanura que tiene especial vinculación a las bajas pendientes topográficas, y ello debe ser considerado en cualquier evaluación

¹ Nota: Las pérdidas económicas específicas del sector agropecuario y los datos de hectáreas afectadas provienen de informes técnicos de la Confederación de Asociaciones Rurales de Buenos Aires y La Pampa (CARBAP) y organismos oficiales provinciales.

hidrológica. Debido a esta característica, surge como un desafío desarrollar investigaciones y aplicaciones hidrológicas en las grandes llanuras, que se enfoquen en desarrollar herramientas que se contextualicen en un concepto de hidrocomplejidad, cuya finalidad sea identificar y resolver problemas hídricos complejos, en distintos ecosistemas y zonas climáticas (Kruse & Ainchil, 2017).

La elección de la cuenca A1 del río Salado como área de estudio fue considerada debido a sus características geomorfológicas singulares, que condicionan su vulnerabilidad hidrológica. Con pendientes regionales extremadamente bajas, menores al 0,1% (menos de 1 metro de desnivel por kilómetro), la región presenta uno de los relieves más planos del planeta en áreas productivas (Kruse & Zimmermann, 2002). Esta configuración topográfica establece que los movimientos verticales del agua (precipitación, evapotranspiración, infiltración) predominan sobre los flujos horizontales, generando condiciones únicas de anegamiento prolongado (Entraigas *et al.*, 2019). Dichas condiciones implican que la mayoría del agua precipitada puede infiltrarse o evapotranspirarse, sin vías de evacuación superficial eficientes, lo cual incrementa significativamente la vulnerabilidad ante eventos de precipitación extrema.

Otro factor determinante es la transformación del uso del suelo experimentada en las últimas cuatro décadas. García *et al.* (2018) demostraron mediante modelación hidrológica distribuida en la cuenca del Salado, que el aumento de las precipitaciones es el fenómeno que explica en mayor medida el incremento observado en los niveles freáticos, pero que el cambio en el uso del suelo (sustitución de pasturas naturales por agricultura) también juega un rol altamente significativo en la dinámica hídrica de la cuenca. Guerra *et al.* (2024) documentaron que, en cuencas similares de la región pampeana, el área agrícola se duplicó del 29% al 66% durante el período 1980-2020, constituyéndose en el factor dominante para explicar los cambios hidrológicos observados. Houspanossian *et al.* (2023) demostraron que la expansión de la agricultura de secano en las llanuras sudamericanas provocó el ascenso del nivel freático desde profundidades de 12,6 metros a 4 metros, duplicando efectivamente la cobertura de inundaciones. Este fenómeno, resultado de la sustitución de vegetación nativa perenne por cultivos anuales, con sistemas radicales menos profundos y menor evapotranspiración, ha incrementado dramáticamente la sensibilidad del sistema a las precipitaciones.

Además, la elección del tema se fundamenta en la evidencia científica sobre la intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos en la región. Barros *et al.* (2015) documentaron que desde 1970 la temperatura media anual aumentó 1°C en la región pampeana, con un incremento del 10% en la precipitación anual desde 1911, concentrándose principalmente en el período estival. Müller (2021) indica que es más significativo aún el cambio en el patrón de precipitaciones, donde los eventos de precipitación intensa han aumentado en frecuencia e intensidad, mientras que los días secos consecutivos también se han incrementado, resultando en que más precipitación anual cae en menos días.

Kuppel *et al.* (2015) identificaron dos tipologías de inundación características de las Pampas: "inundaciones lentas" que persisten durante varios años cuando la capa freática aflora tras precipitación sostenida, y "inundaciones rápidas" activadas por acumulación superficial en semanas a meses. Durante episodios extremos como los ocurridos entre 2000-2003, la cobertura de agua superficial alcanzó el 31% en la Pampa Occidental y el 19% en la Pampa Inferior, evidenciando la magnitud del impacto en los sistemas naturales y productivos.

En este contexto específico del noroeste bonaerense, los impactos sociales incluyen el aislamiento de comunidades rurales durante meses, la interrupción de actividades educativas (con escuelas rurales

sin clases durante 3 o más meses por caminos intransitables), y la pérdida de medios de vida de pequeños productores y trabajadores rurales (CARBAP, 2025). Estos grupos vulnerables, particularmente pequeños productores ganaderos y familias en asentamientos periurbanos, enfrentan situaciones críticas con compromisos financieros que muchos no podrán cumplir.

Junto con Gómez *et al.* (2017), el Grupo de Geofísica de la FCAyG de la UNLP, se planteó un nuevo límite ajustado de la cuenca hidrográfica A1, definido por la topografía de la zona, el cual fue utilizado como área de estudio, reemplazando a la región hidrográfica del PMRS, que sólo limita a la provincia de Buenos Aires, como se expresa en un capítulo específico de esta tesis.

1.2 Necesidad de enfoques integrados y herramientas de gestión geoespacial

Esta tesis aplica metodologías validadas para identificar y jerarquizar los potenciales efectos del clima, evaluar los factores que condicionan la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos y caracterizar la vulnerabilidad hidrológica del área de estudio. Para ello, se integran modelaciones hidrológicas, técnicas de teledetección y procesos de validación a campo, bajo un enfoque espacialmente explícito.

Su abordaje requirió del desarrollo de enfoques metodológicos integrados que combinen múltiples fuentes de información y técnicas de análisis. La disponibilidad actual de tecnologías satelitales y teledetección (Sentinel 2, Landsat 8/9, MODIS), modelos digitales de elevación mejorados (STRM, Copernicus DEM), y capacidades de procesamiento en plataformas como Google Earth Engine, permitió el desarrollo de sistemas de evaluación de vulnerabilidad hidrológica adaptados a las condiciones específicas de las llanuras, como lo expresan Meadows & Wilson (2021) y Hawker *et al.*, (2022).

La investigación propuesta también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 6.6.1, que cuantifica la proporción de ecosistemas relacionados con el agua en buenas condiciones ecológicas, debido a conocer la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca.

La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con técnicas de análisis multicriterio, como el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), ha demostrado su efectividad en la evaluación de vulnerabilidad a inundaciones en ambientes similares. Borzi *et al.* (2021) aplicaron exitosamente esta metodología en la cuenca del río Samborombón, identificando 1.961 habitantes en asentamientos urbanos dentro de áreas de alta amenaza de inundación. Esta aproximación metodológica, adaptada a las características específicas de la cuenca A1, permitió generar información espacialmente explícita para la toma de decisiones. La generación de indicadores de vulnerabilidad hidrológica contribuirá al cumplimiento de estas metas internacionales, proporcionando herramientas concretas para el monitoreo y la gestión adaptativa de los recursos hídricos.

El desarrollo de una metodología específica para la evaluación de vulnerabilidad hidrológica en la cuenca A1 tiene implicaciones que trascienden a nivel regional. La metodología propuesta podrá ser replicada en otras cuencas de llanura de la región pampeana que comparten características similares, contribuyendo al desarrollo de conocimiento sobre la fragilidad de estos sistemas hidrológicos únicos.

Además, los resultados proporcionan bases científicas sólidas para el diseño de políticas de ordenamiento territorial basadas en evidencia científica, la implementación de sistemas de alerta temprana adaptados a las características de respuesta lenta de las llanuras, el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático específicas para ambientes de llanura, priorizando intervenciones

según niveles de vulnerabilidad y la posible formulación de planes de contingencia diferenciados según las características morfométricas y de vulnerabilidad de cada subcuenca.

El desarrollo de herramientas científicamente fundamentadas para la evaluación de vulnerabilidad hidrológica contribuirá a optimizar la asignación de recursos y priorizar intervenciones en las áreas de mayor riesgo.

1.3 Marco conceptual

En la presente investigación se integra fundamentos teóricos esenciales que sustentan el análisis de la vulnerabilidad hidrológica en ambientes de llanura, estableciendo bases conceptuales sobre los procesos hidrológicos, las unidades de análisis territorial, los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con ecosistemas acuáticos, las herramientas geoespaciales disponibles para el análisis hidrológico, y la conceptualización de la vulnerabilidad hidrológica como eje central de la investigación. La articulación de estos conceptos contribuye a comprender la complejidad de los sistemas hidrológicos en la cuenca A1 del Río Salado y fundamenta la metodología de evaluación desarrollada.

1.3.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico constituye el sistema natural de reciclaje del agua en la Tierra, describiendo el movimiento continuo del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera a través de diversos procesos físicos que operan a múltiples escalas espaciales y temporales. Este ciclo representa uno de los procesos fundamentales del sistema terrestre, esencial para la sostenibilidad de los ecosistemas, la regulación climática y el soporte de todas las formas de vida (Bárbulescu, 2025).

Van der Ent & Tuinenburg (2017) expresan que el agua experimenta transformaciones constantes entre sus tres estados físicos (líquido, gaseoso y sólido) mediante procesos que incluyen evaporación, transpiración, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía superficial y flujo subsuperficial. La energía solar constituye el motor principal del ciclo hidrológico, proporcionando aproximadamente el 50% de la radiación solar recibida en la superficie terrestre para evaporar agua. El agua en la atmósfera tiene un tiempo de residencia promedio de aproximadamente 8-10 días antes de precipitar como lluvia o nieve, y de esta forma reiniciar el ciclo.

Los componentes principales del ciclo hidrológico operan de manera interconectada formando un sistema complejo. La evaporación representa la transformación del agua líquida en vapor debido a la energía térmica, proceso que proporciona aproximadamente el 90% de la humedad atmosférica desde océanos, mares, ríos y lagos. La transpiración, proceso mediante el cual las plantas liberan vapor de agua a través de estomas en sus hojas, constituye un componente fundamental que integra los ciclos hidrológico y biológico. La precipitación, fase final del transporte atmosférico, devuelve el agua a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve, granizo o aguanieve, constituyendo el principal *input* de agua dulce en los sistemas terrestres (Chow *et al.*, 1994).

Una vez que la precipitación alcanza la superficie terrestre, el agua sigue diversos caminos determinados por las características del paisaje, la cubierta vegetal y las propiedades del suelo. La infiltración representa el movimiento descendente del agua a través del perfil del suelo hacia capas más profundas, siendo fundamental para la recarga de acuíferos que almacenan agua subterránea. La escorrentía superficial constituye el agua que no se infiltra y fluye sobre la superficie terrestre hacia

arroyos, ríos y lagos, siendo influenciada por la topografía del terreno, la saturación del suelo y la vegetación. El flujo de agua subterránea, almacenada en acuíferos bajo la superficie terrestre, se mueve lentamente a través de capas de roca y suelo, descargando eventualmente en ríos, lagos y océanos, cumpliendo un rol significativo en el mantenimiento de caudales base y el suministro de agua dulce (Rodríguez & Jacinto, 2017).

La investigación científica reciente ha documentado una intensificación del ciclo hidrológico global atribuible al calentamiento antropogénico, fenómeno que se manifiesta en cambios observables y proyectados en los patrones de precipitación, evaporación y escorrentía (Douville *et al.*, 2021). El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático concluyó con alto nivel de confianza que el cambio climático antropogénico ha incrementado la humedad atmosférica y la intensidad de la precipitación en aproximadamente 2-3% por cada 1°C de calentamiento global (Douville *et al.*, 2021). Esta intensificación se fundamenta en que las temperaturas más elevadas incrementan el límite superior de humedad que la atmósfera puede contener, siguiendo la relación de Clausius-Clapeyron, que aumenta el potencial para eventos de precipitación más intensos (Huntington, 2006). Los modelos climáticos proyectan que el ciclo del agua podría intensificarse hasta un 7% por cada grado Celsius de calentamiento global, lo que implica que las áreas húmedas se volverán más húmedas y las áreas secas se tornarán más secas (Bárbulescu, 2025).

En ambientes de llanura como la región pampeana argentina, el ciclo hidrológico presenta características distintivas que modifican sustancialmente la dinámica hidrológica respecto a cuencas con mayor relieve. Las pendientes extremadamente bajas (Sala *et al.*, 1983), generan condiciones donde el relieve local puede constituir un impedimento mayor para el drenaje que la pendiente regional misma. Esta configuración topográfica resulta en que los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) predominen sobre la escorrentía superficial concentrada (Kruse & Zimmermann, 2002).

La infiltración y la evapotranspiración adquieren mayor relevancia relativa en estos ambientes, donde los sistemas de drenaje enfrentan severas dificultades para organizarse debido a las pendientes extremadamente bajas (Varni *et al.*, 2019). La acumulación de agua superficial durante períodos húmedos es frecuente, dado que la capacidad de evacuación por escorrentía concentrada es limitada, favoreciendo procesos de anegamiento por saturación del suelo más que por desborde de cauces definidos. Esta característica cobra particular relevancia, donde la intensificación de eventos extremos de precipitación interactúa con las limitaciones morfológicas del terreno para generar condiciones de vulnerabilidad hidrológica específicas.

1.3.2 Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades físicas fundamentales que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible de los recursos hídricos (Gaspari *et al.*, 2010; United Nations Environment Programme, 2025). Una cuenca hidrográfica se define como el área geográfica que capta agua proveniente de precipitación, deshielo, escorrentía superficial y flujos subsuperficiales, canalizándola hacia un río, lago u océano (Hattermann *et al.*, 2017). La definición de sus límites y de sus características morfológicas, ambientales y sociales resultan fundamentales para comprender los procesos hidrológicos y establecer estrategias apropiadas de manejo integral del agua.

1.3.2.1 Delimitación y características fundamentales

La delimitación de una cuenca hidrográfica se fundamenta en la identificación de las divisorias de agua o divisorias topográficas, definidas como los puntos altimétricos más elevados que determinan la dirección de circulación del escurrimiento superficial hacia una línea de convergencia de aguas superficiales y subterráneas que define al canal principal o río (Gaspari *et al.*, 2010). Esta divisoria topográfica constituye una línea virtual trazada sobre las cotas más altas en un plano que se inicia en las divisorias de aguas, estableciendo el límite de la unidad hidrológica.

El concepto de cuenca trasciende las delimitaciones administrativas convencionales, reconociendo que el agua fluye según características naturales independientemente de fronteras políticas (International Network of Basin Organizations & Global Water Partnership, 2009). Esta perspectiva resulta fundamental para la gestión integrada de recursos hídricos, estableciendo que, desde el punto de vista de los recursos hídricos, resulta más apropiado planificar y gestionar el agua según límites de cuenca.

Las cuencas hidrográficas funcionan como sistemas dinámicos bio-físicos donde interactúan procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y antropogénicos a múltiples escalas temporales y espaciales (Hattermann *et al.*, 2018; Marshall & Tran, 2025).

1.3.2.2 Cuenca como unidad de análisis hidrológico

Las cuencas hidrográficas representan la unidad fundamental para comprender los procesos hidrológicos y constituyen la base para la planificación y gestión de recursos hídricos (Hattermann *et al.*, 2017). El almacenamiento y movimiento del agua a escala de cuenca resulta complejo debido a los procesos acoplados que operan en múltiples escalas espaciales y temporales, influenciados adicionalmente por el cambio climático y las actividades humanas que incrementan la complejidad de estos procesos conduciendo cambios hidrológicos (Hattermann *et al.*, 2018).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas, aportando datos básicos fundamentales para los modelos hidrológicos (Gaspari *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2013). Los parámetros morfométricos expresan el nivel de fragilidad de estas unidades de gestión territorial, debido a que el conocimiento de la variación espacial de los parámetros de forma, relieve y drenaje permite manifestar y diseñar las líneas generales del movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari *et al.*, 2012; Guzmán *et al.*, 2021).

La incorporación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y tecnologías de teledetección ha potencializado el proceso de caracterización morfométrica, permitiendo análisis más rápidos, precisos y económicamente viables en comparación con métodos convencionales que demandaban considerable tiempo, recursos económicos y esfuerzo de campo (Agarwal, 1998; Singh *et al.*, 2013). La jerarquización de cuencas según su fragilidad morfométrica constituye un elemento fundamental para el desarrollo de programas de gestión eficientes y sostenibles, optimizando la asignación de recursos y la implementación de intervenciones de mitigación (Chowdary *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2013).

1.3.2.3 Particularidades de las cuencas de llanura

Las cuencas de llanura presentan características hidrogeomorfológicas distintivas que generan dinámicas hidrológicas significativamente diferentes a las cuencas de montaña o de relieve ondulado. La llanura pampeana argentina representa un ejemplo paradigmático de estos sistemas, caracterizándose por ser una gran planicie sedimentaria de baja elevación que ha sido íntegramente transformada a la producción agrícola (Soriano *et al.*, 1992; Viglizzo *et al.*, 2001, Rainhart *et al.*, 2024).

El sistema hidrológico en estas cuencas presenta pendientes extremadamente bajas y escurrimiento lento, características que favorecen la acumulación de agua superficial en períodos húmedos (Aragón *et al.*, 2011; Dornes *et al.*, 2015). Aproximadamente el 35% del área terrestre argentina está dominada por amplias llanuras con registros históricos de sequías e inundaciones, cubriendo aproximadamente 950.000 km² en las áreas del Chaco y la Pampa. Estas áreas se caracterizan por un paisaje espectacularmente plano, donde el relieve local puede ser un impedimento para el drenaje de agua incluso mayor que la pendiente regional (Sala *et al.*, 1983).

Los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) predominan sobre el escurrimiento superficial concentrado, razón por la cual las inundaciones son frecuentes y prolongadas, caracterizándose más por anegamiento por saturación que por desbordamiento de cauces definidos (Aragón *et al.*, 2011; Kruse & Ainchil, 2017). En estas condiciones, los sistemas de drenaje enfrentan severas dificultades para organizarse, presentando densidades de drenaje muy bajas y patrones poco desarrollados (Kruse & Zimmermann, 2002).

La gestión de estas cuencas de llanura requiere enfoques específicos que consideren estas particularidades hidrogeomorfológicas. Esta configuración necesita metodologías adaptadas para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica que incorporen las características específicas de ambientes de llanura con escasa pendiente (Borzi *et al.*, 2021).

1.3.2.4 Gestión integrada de recursos hídricos en cuencas

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) a escala de cuenca representa un enfoque que reconoce la interconexión de todos los ecosistemas de agua dulce (ríos, lagos, turberas, pantanos, ciénagas y aguas subterráneas) que sustentan la salud global y el bienestar humano (UNEP, 2025). Los Planes de Manejo de Cuenca establecen objetivos clave y programas necesarios para alcanzar metas ambientales, considerando cómo diferentes actores en la cuenca toman decisiones que impactan la calidad y cantidad de los recursos hídricos disponibles (INBO & GWP, 2009).

La protección y restauración de ecosistemas de agua dulce requiere desarrollar una gestión de cuencas sostenible, coherente e integral que revalorice, restaure y reconecte las cuencas hidrográficas, generando beneficios tangibles para los actores locales y nacionales (UNEP, 2025). Mientras que la GIRH proporciona un marco general para integrar la planificación del uso del agua entre múltiples sectores y escalas, la gestión de cuencas se enfoca en intervenciones localizadas dentro de unidades hidrológicas definidas para beneficio local y salud ecológica (UNEP, 2025).

La gestión de cuencas resulta clave para salvaguardar ecosistemas saludables, fortalecer de la resiliencia al cambio climático, y garantizar de acceso sostenible a agua potable y saneamiento seguro para todos (UNEP, 2025). Este enfoque también sustenta medios de vida, como la agricultura – ganadería – forestación , mientras respeta y valora las prácticas sociales, culturales, turísticas y

recreativas que son importantes para las comunidades. Al gestionar la cuenca como un sistema conectado, se fomenta la salud ambiental a largo plazo y la estabilidad socioeconómica para las generaciones presentes y futuras.

1.3.3 Plan Maestro de la cuenca del Río Salado de la provincia de Buenos Aires

El área de estudio corresponde al noroeste de la cuenca del Río Salado (CRS) según el Plan Maestro del Río Salado (PMRS), particularmente la zona que abarca a la subregión A1, como se muestra en la Figura 1.1. El diseño del PMRS partió de un diagnóstico que identificó la baja pendiente del cauce del río como un factor crítico en la persistencia de las inundaciones. Con un gradiente promedio de apenas un metro cada diez kilómetros, el escurrimiento superficial resultaba ineficiente, favoreciendo la acumulación de agua en períodos de crecidas y la consecuente anegación de amplias extensiones de terreno (MOSP, 1999).

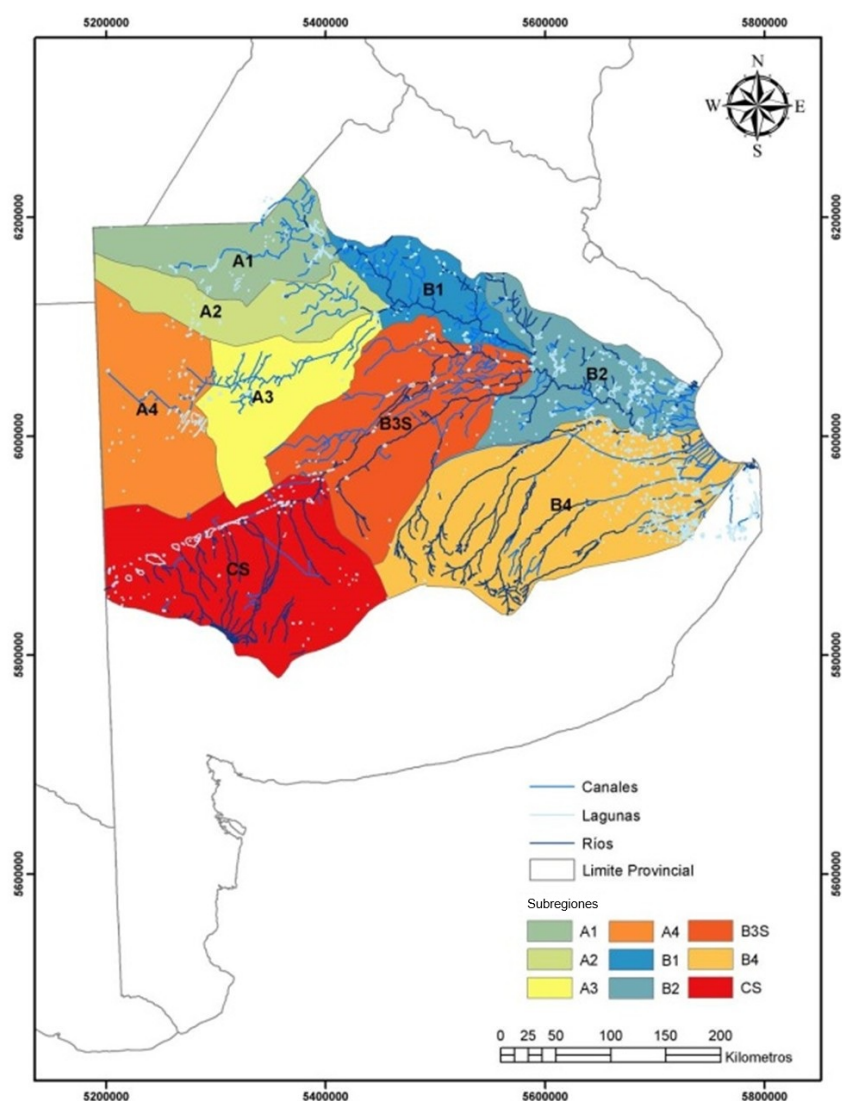


Figura 1.1 Subregiones de la cuenca del Río Salado. Provincia de Buenos Aires. Plan Maestro del Río Salado. Fuente: (MOSP, 1999).

El PMRS se estructuró con el objetivo de reducir estos riesgos mediante el dragado y ensanchamiento del cauce en 700 kilómetros, permitiendo una mejor conducción del caudal y la recuperación de 8,5 millones de hectáreas productivas. Asimismo, incorporó estrategias para la protección de centros urbanos, el desarrollo sustentable del sector agropecuario, la promoción del turismo y la conservación del patrimonio ambiental.

Para su implementación, se convocó a una Consultoría Internacional que diseñó un conjunto de acciones, incluyendo obras hidráulicas para optimizar el drenaje y medidas de apoyo a la producción y el turismo. De este modo, el PMRS se consolidó como un modelo integral de gestión territorial, orientado a fortalecer la resiliencia regional y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

La región del noroeste de la CRS se caracteriza principalmente por bajas pendientes topográficas, pocos cursos fluviales bien definidos y materiales permeables en la superficie del terreno. Ello hace que al producirse precipitaciones el agua no tienda a escurrir por la superficie, sino que predominen los movimientos verticales, como son la filtración a través del suelo, evaporación y transpiración (Kruse & Ainchil, 2017). El paisaje en esta zona es producto de la acción de agregación fluvial, modificada parcialmente por la acción del litoral y los vientos. Los suelos presentan un importante grado de desarrollo producto de la baja morfogénesis, donde se presentan amplias terrazas fluviales y planicies aluviales surcadas por numerosos cursos de agua, frecuentes bajos y lagunas de poca profundidad (Gómez *et al.*, 2017).

La mayor parte de la región es abastecida por aguas subterráneas, siendo su principal destino el uso humano e industrial. Existen áreas de explotación intensiva en coincidencia con los conglomerados urbanos e industriales litorales, y otra menos evidenciada en las zonas rurales (Sala & Benítez, 1993), provocando un aumento del deterioro de la calidad de agua a nivel subterráneo, generando problemáticas hidrológicas a futuro, por lo cual es necesario identificar adecuadamente la geohidrología de la región y su posible interacción con las aguas superficiales.

La problemática de estos sectores se ha visto agravada por el comportamiento de canalizaciones que transfieren los excedentes de agua a sectores que ya tienen una situación de saturación, que luego se ve agravada por la ocurrencia de precipitaciones (Kruse & Ainchil, 2017). La mayoría de los ríos de la región están regulados por los patrones regionales de precipitación y en menor medida por las variaciones de la temperatura según estudios dendrocronológicos (Ferrero *et al.*, 2015).

La actividad agropecuaria predomina la economía de la cuenca del Río Salado y es responsable del 25 al 30% de la producción nacional de granos y carne. El suelo superficial se compone con una gran diversidad que incluye vastas regiones de potencial agrícola de alta productividad, combinado a otras de gran calidad ambiental (MOSP, 1999). La capacidad productiva de los suelos permitió que los pastizales pampeanos se sustituyeran por el avance de los agroecosistemas, evidenciando un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación.

Por otra parte, el factor antrópico tiene un papel preponderante, ya que son numerosas las oportunidades en las cuales las rutas, canales o ferrocarriles promueven la modificación de la distribución natural de las aguas (Kruse & Ainchil, 2017).

A nivel general, en la CRS se identifican diversos factores que inciden en la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, particularmente aquellos asociados al exceso hídrico, los cuales resultan clave para la cuantificación de la vulnerabilidad en cuencas hidrográficas. Dicha evaluación puede abordarse mediante la integración de análisis morfométricos, climáticos y de cambios de uso y cobertura del

suelo, apoyados en el empleo de herramientas geomáticas específicas e imágenes satelitales. No obstante, existen escasos estudios que analicen de manera integral las características morfométricas de la cuenca del río Salado y su respuesta hidrológica natural frente a las transformaciones antrópicas, en gran medida debido a su extensa superficie y a la marcada heterogeneidad interna.

Asimismo, se reconoce una limitada disponibilidad de investigaciones orientadas a la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica a escala regional y de cuenca. En este contexto, se evidencia la necesidad de integrar indicadores de vulnerabilidad hidrológica que contribuyan a la formulación de planes de manejo integral en las cuencas de la región, en colaboración con el PMRS.

Por ello, en esta tesis se integra la jerarquización de las cuencas en función de su rendimiento hídrico y de las características del paisaje lo cual permite identificar zonas críticas y prioritarias según su nivel de vulnerabilidad, facilitando así la definición e implementación de medidas de adaptación.

1.3.4 Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.6.1

Los ecosistemas relacionados con el agua representan un subconjunto de todos los ecosistemas, conteniendo los recursos de agua dulce del mundo y pudiendo definirse como "un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales y microorganismos, y el ambiente no vivo dominado por la presencia de agua fluyente o estancada, interactuando como una unidad funcional" (MEA, 2005; Dickens *et al.*, 2019).

La protección y restauración de estos ecosistemas resulta crucial para mitigar y fortalecer la resiliencia al cambio climático (UNEP, 2021). Los humedales, por ejemplo, capturan carbono de la atmósfera y protegen áreas costeras de marejadas ciclónicas, mientras que en áreas continentales protegen tanto de inundaciones como de sequías mediante la retención de agua. La información sobre la extensión de aguas superficiales permanentes y estacionales, la extensión de humedales y la dinámica de embalses contribuye significativamente a la caracterización hidrológica de cuencas y a la identificación de zonas de vulnerabilidad (UNEP, 2022).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en 2015, constituyen una agenda global para abordar desafíos socioambientales críticos para 2030 (UNEP, 2020a). El ODS 6 busca específicamente garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, integrando dimensiones ambientales, sociales y económicas. Dentro de este marco, la meta 6.6 se enfoca en proteger y restaurar ecosistemas relacionados con el agua para 2020, incluyendo montañas, bosques, humedales, ríos, acuíferos y lagos, reconociendo su rol vital en la regulación hídrica y la biodiversidad (UNEP, 2020b).

El indicador 6.6.1, definido como "Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo", constituye una herramienta de medición multifacética que capta datos sobre diferentes tipos de ecosistemas de agua dulce para cuantificar cambios en su extensión espacial. Este indicador facilita el monitoreo de la degradación ambiental, y sirve como insumo clave para políticas de planificación territorial y adaptación al cambio climático. El mismo se estructura alrededor del monitoreo de diferentes tipos de ecosistemas relacionados con el agua, incluyendo lagos, ríos, humedales, aguas subterráneas y cuerpos de agua artificiales como embalses (UNEP, 2022).

Los avances recientes en el análisis de imágenes satelitales han permitido el desarrollo de conjuntos de datos globales sobre calidad del agua de lagos, manglares costeros y áreas de humedales

continentales (Pekel *et al.*, 2016). Estas observaciones terrestres se utilizan para determinar cambios en cuerpos de agua superficial (UNEP, 2020b). La metodología global utiliza series de datos satelitales de cobertura global y acceso público gratuito, con coherencia temporal y series temporales largas que permiten la replicabilidad a lo largo del tiempo, haciendo que el reporte de cambios desde valores de referencia sea consistente y sistemático, por ejemplo, aplicando sensores satelitales que proporcionan datos esenciales para caracterizar la distribución espacial y temporal de ecosistemas acuáticos a escala global (Pekel *et al.*, 2016; Committee on Earth Observation Satellites, 2022).

Los datos más recientes del indicador 6.6.1 revelan una situación crítica respecto al estado de los ecosistemas relacionados con el agua a nivel global. El reporte de medio término de 2024 muestra que el 50% de los países (90 de 185 países reportantes) tienen uno o más tipos de ecosistemas relacionados con el agua en estado de degradación (UNEP, 2024). En 2022, el 21% de las cuencas hídricas del mundo experimentaba cambios rápidos en el área cubierta por aguas superficiales permanentes, proporción que aumentó al 25% en 2024 (UNEP, 2020b).

En el contexto de este trabajo de tesis, el marco metodológico del ODS 6.6.1 proporciona fundamentos conceptuales y herramientas técnicas valiosas para el análisis de la cuenca A1 del Río Salado. Los datos de Observación de la Tierra disponibles a través del marco global de informes del ODS 6.6.1 permitieron identificar y rastrear variaciones en la extensión espacial de ecosistemas acuáticos en la región de estudio, contribuyendo a la caracterización hidrológica de la cuenca y a la identificación de zonas de vulnerabilidad.

El manejo y definición de indicadores contemplados en esta tesis incorporó los principios establecidos por el ODS 6.6.1, complementándolos con aproximaciones específicas para ambientes de llanura. La calificación para cada tipo de vulnerabilidad se determina mediante el procesamiento con metodología de Análisis Jerárquico (Saaty, 1980) de los indicadores evaluados, generando la zonificación de la vulnerabilidad hidrológica para eventos extremos de excesos hídricos mediante geoprocесamientos espaciales con herramientas SIG (Borzi *et al.*, 2021).

Esta metodología generó información temática actual y útil para la toma de decisiones, aportando una base de datos geográfica confiable para avanzar en el planteo de medidas y estrategias de adaptación ante los cambios de uso del suelo y climáticos. Los resultados aportarán soportes sólidos disponibles para la generación de escenarios que contemplen la vulnerabilidad hidrológica, permitiendo evaluar y visualizar diversas causas y efectos en la zona de estudio provenientes de eventos hidrológicos extremos, contribuyendo como herramienta para el mejoramiento de la planificación territorial y la mitigación de problemáticas hidrológicas superficiales presentes en la región noroeste de la provincia de Buenos Aires.

1.3.5 Herramientas geográficas

Las herramientas geográficas, particularmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las tecnologías de teledetección, se han consolidado como instrumentos fundamentales para el análisis hidrológico, la gestión de recursos hídricos y la evaluación de vulnerabilidad en cuencas hidrográficas (Moore *et al.*, 1991; Thakur *et al.*, 2017). La integración de estas tecnologías con modelos hidrológicos ha revolucionado la capacidad de proporcionar conocimientos hidrológicos con mayor precisión espacial y temporal, permitiendo el desarrollo de estrategias sostenibles de gestión ante las crecientes presiones ambientales (Thakur *et al.*, 2017).

1.3.5.1 *Sistemas de Información Geográfica en hidrología*

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen herramientas tecnológicas complejas específicamente diseñadas para adquirir, retener, analizar y gestionar datos espaciales y geográficos (Chatrabhuj *et al.*, 2024). En el campo de la hidrología, los SIG han emergido como instrumentos útiles e importantes para estudiar y gestionar los recursos hídricos de la Tierra, proporcionando marcos para la manipulación e ingreso de datos en modelos hidrológicos computacionales complejos.

La topografía de una cuenca ejerce un impacto determinante sobre los procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos activos en el paisaje, y la distribución espacial de los atributos topográficos puede utilizarse frecuentemente como una medida indirecta de la variabilidad espacial de estos procesos (Moore *et al.*, 1991). Por ello, en el análisis hidrológico, los SIG permiten extraer numerosos parámetros significativos a partir de modelos digitales de elevación, incluyendo direcciones de flujo, áreas de acumulación, redes de drenaje, delimitación de cuencas y subcuencas, identificación de corrientes y cálculo de parámetros morfométricos fundamentales (Jenson & Domingue, 1988; Martz & Garbrecht, 1992).

Las capacidades de manipulación espacial de los SIG resultan idóneas para extraer estos atributos, que históricamente requerían considerable tiempo y recursos cuando se obtenían mediante métodos convencionales de campo, ofreciendo una derivación automatizada más rápida, menos subjetiva y con mayor reproducibilidad que las técnicas manuales tradicionales aplicadas sobre cartografía topográfica (Moore *et al.*, 1991; Martz & Garbrecht, 1992).

La incorporación de los SIG en estudios hidrológicos ha permitido parametrizar eficientemente datos de entrada para diversos modelos hidrológicos distribuidos y de calidad del agua, representando las características espaciales y temporales de los factores que afectan los distintos componentes del ciclo hidrológico, incluyendo el flujo superficial, subsuperficial y subterráneo (Singh & Woolhiser, 2002; Vieux, 2004). La integración de hidrología y SIG resulta natural dado que los procesos hidrológicos son inherentemente espaciales y los modelos hidrológicos distribuidos requieren grandes volúmenes de datos georreferenciados; esta integración involucra tres componentes principales: la construcción de datos espaciales, la integración de capas espaciales del modelo, y la interfaz entre SIG y modelos (Singh & Frevert, 2002). Los avances tecnológicos proporcionados por los SIG, junto con la creciente disponibilidad y calidad de los modelos digitales de elevación, han expandido considerablemente el potencial de aplicación de los MDE en investigaciones hidrológicas, hidráulicas, de recursos hídricos y ambientales (Moore *et al.*, 1991; Singh & Woolhiser, 2002).

1.3.5.2 *Teledetección aplicada al análisis hidrológico*

La teledetección ha adquirido creciente importancia en las ciencias del sistema terrestre, especialmente para el monitoreo del ciclo hidrológico terrestre, con el desarrollo de numerosas misiones satelitales que cubren diversas aplicaciones hidrológicas incluyendo precipitación, humedad del suelo, extensión de inundaciones, nivel de agua superficial, almacenamiento de agua terrestre, nieve y hielo (Patel *et al.*, 2025). La teledetección transforma el análisis de sistemas fluviales al proporcionar vasta cobertura espacial y recolección de datos rápida y frecuente, permitiendo monitoreo casi en tiempo real que facilita la mitigación y toma de decisiones (Chatrabhuj *et al.*, 2024).

La integración de datos de teledetección con SIG permite estudios comprehensivos de procesos hidrológicos incluyendo precipitación, evapotranspiración, esorrentía, humedad del suelo, erosión, extensión de inundaciones y potencial de aguas subterráneas (Patel *et al.*, 2025). Los sensores satelitales como Landsat (1972-presente) y Sentinel-2 (2015-presente) proporcionan herramientas comprehensivas para monitorear, supervisar y examinar múltiples facetas de sistemas fluviales, incluyendo calidad del agua, vulnerabilidad a inundaciones, vegetación y alteraciones en uso del suelo (Chatrabhuj *et al.*, 2024).

1.3.5.3 Modelos Digitales de Elevación

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) constituyen representaciones numéricas de la topografía terrestre que resultan fundamentales para el análisis hidrológico.

La representación del movimiento del agua sobre el terreno hacia los cauces se genera a partir de la aplicación de modelos cartográficos con mapas topográficos en un entorno de sistemas de información geográfica y algunos modelos hidrológicos e hidráulicos (Gaspari *et al.*, 2010). Los MDE, particularmente el SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission) generado por la NASA (2000), constituyen fuentes de datos esenciales para análisis morfométrico y modelación hidrológica (Farr *et al.*, 2007; Galván, 2014).

En ambientes de llanura como la región pampeana, los MDE requieren correcciones altimétricas específicas dadas las pendientes extremadamente bajas. La precisión vertical de los datos SRTM (aproximadamente ± 6 m) puede resultar insuficiente para caracterizar adecuadamente la topografía en áreas extremadamente planas, requiriendo procesos de corrección mediante integración con modelos geopotenciales locales e información altimétrica de campo (Gómez *et al.*, 2006; Galván, 2014).

1.3.5.4 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica constituye una herramienta fundamental para la evaluación y análisis de los recursos hídricos, consistiendo en representaciones simplificadas de la realidad donde entradas y salidas de variables hidrológicas mensurables se conectan mediante ecuaciones matemáticas (Chow *et al.*, 1994). Los modelos hidrológicos permiten simular procesos hidrológicos utilizando precipitación, modelos digitales de elevación, datos de uso del suelo/cobertura del suelo, y datos de suelo para predecir caudales, eventos de inundación y disponibilidad de agua (Hattermann *et al.*, 2018).

Los avances recientes en modelación hidrológica, incluyendo la integración de Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (ML), han revolucionado la capacidad de proporcionar conocimientos hidrológicos con mayor precisión (Marshall & Tran, 2025), que integrados al SIG se implementaron en esta tesis.

1.3.5.5 Integración SIG-teledetección para análisis de cuencas

La integración de tecnologías SIG y teledetección representa una aproximación multidisciplinaria que aprovecha tecnologías geoespaciales para analizar y gestionar recursos hídricos comprehensivamente

(Patel *et al.*, 2025). Esta integración comienza con la adquisición de datos, involucrando la recopilación de varios tipos de datos espaciales como imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, datos de uso del suelo/cobertura del suelo, datos hidrológicos (flujo de corriente y precipitación) y otros conjuntos de datos relevantes.

El mapeo, monitoreo y modelación de recursos hídricos utilizando aproximaciones geoespaciales se han convertido en herramientas cruciales para la gestión sostenible de recursos hídricos. Al integrar imágenes satelitales, datos SIG y técnicas de teledetección, estas aproximaciones ofrecen una comprensión comprehensiva de la disponibilidad, calidad y patrones de uso del agua. El proceso incluye mapeo preciso de características hidrológicas y zonas de potencial de aguas subterráneas, acoplado con monitoreo de calidad del agua y modelación predictiva (Patel *et al.*, 2025).

La revisión sistemática de literatura sobre aplicaciones de teledetección y SIG en hidrología de cuencas revela que, a pesar de avances recientes, los estudios permanecen fragmentados sin considerar sistemáticamente todos los procesos hidrológicos juntos en el contexto de cuencas (Patel *et al.*, 2025). La mayoría de los estudios adoptan una aproximación más *ad hoc* sin pasos de calibración, validación o análisis de incertidumbre adecuadamente implementados y estandarizados. Los estudios regularmente omiten procesos importantes de interacción directa humano-agua como irrigación, procedimientos operacionales de represas y cambio de uso del suelo durante evaluaciones de cuencas, siendo estos críticos para cualquier evaluación en cuencas gestionadas (Wada *et al.*, 2017; Scanlon *et al.*, 2023). Por ello, se integra la validación geoespacial a datos aportados por satélites.

1.3.6 Vulnerabilidad hidrológica

La vulnerabilidad hidrológica, como se mencionó en la fundamentación de la elección de tema de tesis, constituye un concepto integrador fundamental para comprender y gestionar los riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos en cuencas hidrográficas. Este concepto adquiere particular relevancia en el contexto del cambio climático global, donde se ha documentado una intensificación del ciclo hidrológico con incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos tanto de excesos como de déficits hídricos (Douville *et al.*, 2021).

1.3.6.1 Conceptualización de la vulnerabilidad hidrológica

La vulnerabilidad en el contexto de sistemas hidrológicos se define como el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos en un ambiente frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. En el marco específico de cuencas hidrográficas, la vulnerabilidad hidrológica analiza la susceptibilidad de la cuenca para conservar y mantener el régimen hidrológico actual ante posibles alteraciones por variabilidad climática o por la acción antrópica (García-Hidalgo, 2017).

El análisis de vulnerabilidad en cuencas hidrográficas constituye un estudio técnico de diagnóstico que aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico (García-Hidalgo, 2017). Este análisis trasciende la simple caracterización de amenazas para incorporar dimensiones de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa del sistema socio-hidrológico analizado (Anandhi & Kannan, 2018).

1.3.6.2 Vulnerabilidad hidrológica en llanuras con escasa pendiente

Las cuencas de llanura con escasa pendiente presentan características de vulnerabilidad hidrológica particulares que requieren aproximaciones metodológicas específicas, donde las inundaciones constituyen disturbios naturales recurrentes en áreas bajas del paisaje donde la pendiente escasa limita la evacuación de excesos de agua (Aldardasawi & Eren, 2021).

La región pampeana argentina se conforma principalmente de una gran planicie sedimentaria de baja elevación, cuyo sistema hidrológico presenta cuencas de drenaje con baja pendiente y escurrimiento lento que favorece la acumulación de agua superficial en períodos húmedos (Soriano *et al.*, 1992; Viglizzo *et al.*, 2001; Aragón *et al.*, 2011; Dornes *et al.*, 2015). Estas áreas presentan vulnerabilidad específica del recurso hídrico, la cual se analiza considerando la susceptibilidad de la cuenca hidrográfica que la compone para conservar y mantener el régimen hidrológico actual ante posibles alteraciones por variabilidad climática o por acción antrópica (García-Hidalgo, 2017).

En áreas de llanura con escasa pendiente, las medidas estructurales comúnmente utilizadas para mitigar inundaciones no siempre proporcionan buenos resultados, razón por la cual la generación de mapas de amenaza de inundación contribuye a una adecuada gestión de amenazas y prevención de desastres (Borzi *et al.*, 2021).

1.3.6.3 Indicadores de vulnerabilidad hidrológica

Un indicador es una variable observable (cualitativa o cuantitativa) que simplifica la medición de logros o cambios, permitiendo evaluar el rendimiento, el progreso hacia objetivos o la evolución de un fenómeno en el tiempo. Para su determinación, se deben considerar las características específicas del ambiente bajo estudio, particularmente en áreas de llanura donde los procesos hidrológicos dominantes difieren sustancialmente de aquellos en cuencas con mayor relieve.

La construcción de indicadores de vulnerabilidad hidrológica se fundamenta en metodologías que permiten formular índices cualitativos y cuantitativos para identificar cambios en las variables de estudio (Wilches-Chaux, 1989). Los indicadores se construyen a partir de información geográfica recolectada y procesada, incluyendo imágenes de satélite, información vectorial, datos meteorológicos, observaciones de campo, información secundaria bibliográfica y cartográfica, así como resultados de modelos hidrológicos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010; Hernández Atencia, 2024).

En el contexto internacional, diversos organismos como la UNESCO han definido indicadores para el estudio del recurso hídrico superficial que pueden adaptarse según las características de la región estudiada (IDEAM, 2010).

Los indicadores morfométricos determinados mediante técnicas de teledetección en sistemas de información geográfica, utilizando modelos digitales de elevación como el SRTM DEM y puntos de posicionamiento geoespacial obtenidos en campo, permiten identificar subcuencas críticas donde se requiere implementar medidas prioritarias de conservación y manejo integral de recursos hídricos (Guzmán *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021). Por ello, la morfometría establece factores que manifiestan las áreas que presentan fragilidad natural, expresando indicadores de las problemáticas y potencialidades de carácter biofísico de cada cuenca, así como las relaciones entre los múltiples usos

e intereses socio-productivos, constituyendo base para el ordenamiento territorial (Guzmán *et al.*, 2021).

1.3.6.4 Métodos de evaluación y zonificación

El análisis geoespacial de la vulnerabilidad hidrológica y la generación de mapas de amenaza de inundación contribuyen a una adecuada gestión de amenazas y prevención de desastres (Borzi *et al.*, 2021). Metodologías como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) desarrollado por Saaty (1980) permiten la ponderación sistemática de variables para zonificar áreas vulnerables a excesos hídricos, considerando aspectos físicos del terreno, observaciones y mediciones de campo.

La metodología AHP permite evaluar y ponderar descriptores que pueden aceptarse o rechazarse, reduciendo los errores del usuario y proporcionando un enfoque integrador y de apoyo en la evaluación y decisión operativa para hacer frente a problemas complejos que ofrecen alta incertidumbre, objetivos contradictorios en la gestión de recursos naturales, diferentes formas de datos e información, y múltiples perspectivas hacia el entendimiento de sistemas complejos como las cuencas de llanura (Saaty, 1980; Borzi *et al.*, 2021).

Como lo expresan Borzi *et al.* (2021) y otros autores, en cuencas de llanura, como la región noroeste bonaerense, la disponibilidad de cartografía que represente la inundabilidad o áreas con gran potencial de acumulación de excedentes hídricos conforma una excelente herramienta para la gestión de los recursos que la integran. Los mapas resultantes conforman bases de datos geoespaciales que describen características y dinámicas específicas dependiendo de la zona donde ocurren y del fenómeno natural que las causa, como eventos pluviales y/o desbordes de ríos.

1.3.6.5 Vulnerabilidad hidrológica y planificación territorial

La evaluación de vulnerabilidad hidrológica constituye información fundamental para la planificación territorial y el desarrollo de políticas de gestión de riesgos. Los resultados permiten identificar zonas críticas y prioritarias donde se deben implementar medidas de adaptación, ya sean estructurales (obras hidráulicas, sistemas de drenaje) o no estructurales (zonificación de uso del suelo, sistemas de alerta temprana, seguros contra inundaciones) (Borzi *et al.*, 2021).

En el contexto del cambio climático, donde se proyecta una intensificación del ciclo hidrológico con mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos (IPCC, 2022), la evaluación de vulnerabilidad hidrológica adquiere creciente relevancia para la adaptación territorial. La jerarquización de cuencas según su rendimiento hídrico y las características del paisaje permite definir zonas críticas y prioritarias según la vulnerabilidad hidrológica para aplicar medidas de adaptación (Gaspari *et al.*, 2021).

Esta metodología genera información temática útil para la toma de decisiones que constituye un insumo claro y confiable para el planteamiento de medidas y estrategias de adaptación ante los cambios de uso del suelo y climáticos. Los resultados contribuyen como información técnica para el mejoramiento de la planificación territorial y la mitigación de problemáticas hidrológicas superficiales, facilitando la asignación de recursos para intervenciones de conservación y manejo integral de cuencas, particularmente en ambientes de llanura donde las características hidrogeomorfológicas imponen desafíos específicos para la gestión hídrica.

1.4 Objetivos e Hipótesis

1.4.1 Objetivo general

Identificar y evaluar la vulnerabilidad hidrológica producida por la presencia de eventos extremos de exceso hídrico superficial en el noroeste bonaerense, mediante indicadores hidrológicos y ambientales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geográfica y ambientalmente la zona de estudio.
- Estudiar las variables hidrometereológicas para la identificación de eventos extremos.
- Simular y predecir el comportamiento hidrológico aplicado en modelos matemáticos geoespaciales.
- Analizar áreas de inundación por medio de información satelital para delimitar zonas vulnerables.
- Cuantificar y espacializar indicadores de vulnerabilidad hidrológica.
- Zonificación de vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico, que contribuya a la planificación territorial.

1.4.3 Hipótesis

La cuantificación de indicadores hidrológicos ambientales permite zonificar la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico en áreas de llanura.

1.5 Estructura metodológica de la tesis

La propuesta metodológica integra el procesamiento geoespacial de mapas de variabilidad climática, morfometría, uso del suelo, geohidrología, y de simulaciones hidrológicas por medio de modelación y la evaluación multicriterio de índices, para la determinación de zonas con vulnerabilidad hidrológica, aplicable a cuencas hídricas, contribuyendo a la generación de información proveniente del manejo y procesamiento de datos con herramientas SIG (Sistema de Información Geográfica).

Para lograr identificar la vulnerabilidad hidrológica se planteó contextualizar los elementos teóricos encontrados en la literatura del tema de vulnerabilidad, efectuar la identificación de las características operacionales según la metodología propuesta por Anandhi y Kannan (2018), y desarrollar una herramienta de modelación conceptual para dicha vulnerabilidad, basada en cambios climáticos extremos o excesos hídricos en la región de estudio.

Inicialmente se recolectaron datos pluviales, obtenidos de diferentes fuentes de información, principalmente de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) Secretaría de Recursos Hídricos de Nación ², al igual que fuentes como el Servicio Meteorológico Nacional ³; y de estaciones meteorológicas pertenecientes a universidades de la región, municipios y otras disponibles en la provincia de Buenos Aires. Además, fue posible obtener información por medio de convenios y proyectos de investigación desarrollados por el Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), del cual fui becario doctoral. Se contempló analizar datos hidrometeorológicos a una escala temporal de 25 años.

Para la manipulación de la información meteorológica e hidrológica, en el caso de encontrarse incompletas se siguieron procesos estadísticos para garantizar su completitud. Estos procesos fueron algoritmos de interpolación, estableciendo previamente la escala espacial de trabajo, las características geográficas y las climáticas de la zona en estudio. Para este fin se implementaron métodos geoestadísticos como son Kriging y Spline, los cuales son muy utilizados para este tipo de variables (Espinosa Marín, 2016).

Otra fuente de datos hidrometeorológico complementaria fue el uso y procesamiento de imágenes de satélite. Los sensores satelitales como el TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) y el GPM (Global Precipitation Measurement), brindan información de precipitaciones, cuyas misiones están habilitadas desde el 1997 al 2015 y del 2014 a la actualidad, respectivamente. La información de estos sensores satelitales, procesada por varios modelos meteorológicos, se obtuvo por medio de la herramienta Giovanni⁴ (Goddard Online Interactive Visualization AND aNalysis Infrastructure) desarrollado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Berrick *et al.*, 2009). También se utilizó la fuente de datos del Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS⁵) de la University of California, para la disponibilidad de imágenes ráster de precipitación para la modelación hidrológica (Nguyen *et al.*, 2020).

Respecto a las imágenes satelitales para cobertura del suelo, los productos del sensor Landsat 8⁶ y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que brindaron además, información en sus bandas multispectrales para el cálculo de la evapotranspiración, a diferente resolución espacial (30

² <http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/>

³ <https://www.smn.gob.ar/>

⁴ <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

⁵ <https://chrsdata.eng.uci.edu/>

⁶ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

metros y entre 250 y 500 metros respectivamente), el cual fue un insumo necesario para la implementación de modelos hidrológicos, como el que se empleó en la presente tesis. Considerando que la resolución espacial del satélite Landsat es mayor, se utilizó dicha información por medio del Mapeo y Evapotranspiración en Alta Resolución con Calibración Internalizada (METRIC por sus siglas en inglés) para acceder a datos de evapotranspiración confiables.

Los mapas de uso y cobertura del suelo se complementaron con relevamiento a campo y con cartografía e informe técnico del inventario de áreas cultivadas, elaborado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) para los años 2020-2021 (De Abelleira *et al.*, 2021), conformando una base de datos geoespacial con validación por antecedentes.

La caracterización edáfica se llevó a cabo a partir de la manipulación y análisis de la base de datos digital del Atlas de Suelos de la Provincia de Buenos Aires a 1:50.000, de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (1989)⁷. Para la validación de la información recolectada de las anteriores fuentes, se planteó un relevamiento edáfico superficial de puntos de control y visitas de campo en el área de estudio, con apoyo de imágenes satelitales Landsat.

Para contrastar los cuerpos de agua o áreas inundables se analizó información satelital en formato de datos vectoriales multitemporales provenientes de Observatorio de Inundación de Dartmouth⁸ de la Universidad de Colorado de Estados Unidos (siglas en inglés DFO). Esta información se encuentra a nivel diario, poseyendo registros desde el año 1993 hasta el 2015 (Brakenridge *et al.*, 2015). Dichos datos muestran el pico de inundación en un promedio de 5 días, con lo cual son fácilmente identificables las zonas que son propensas a inundación y las que constantemente se encuentran anegadas. De esta forma fue posible validar las zonas inundables obtenidas con imágenes SAR y con información cartográfica existente de cuerpos de agua, como por ejemplo cartografía oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Jarihani *et al.* (2015) mencionan que diversos estudios han demostrado que es posible trabajar en zonas planas o de bajo gradiente utilizando modelos digitales de elevación (MDE) de 30 metros con fines hidrológicos. Por ello, reconociendo que la topografía de la zona de estudio representa una baja pendiente del cual depende el comportamiento hidrológico, se realizó un análisis de alta precisión para definir adecuadamente su dinámica superficial, utilizando un MDE. Para ello se trabajó en forma interdisciplinaria con el equipo de Lic. Raúl Perdomo y la Dra. María Eugenia Gómez de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la U.N.L.P., para definir la zona en estudio, generando la delimitación de la cuenca A1. Esta fue obtenida con un MDE de la misión Shuttle Radar Topography (SRTM) de 30 metros de resolución espacial, corregido altimétricamente mediante mediciones de campo y ajustes por puntos de nivelación con instrumental geofísico (Gómez *et al.*, 2017).

Con los MDE mencionados, y utilizando herramientas geográficas SIG, con el software libre QGIS, fue posible realizar la caracterización morfométrica del área en estudio. Esto contribuye al entendimiento la dinámica hídrica y la identificación de índices o criterios en la búsqueda de la vulnerabilidad hidrológica de la región, con base en características físicas morfométricas como lo son la forma, relieve y red de drenaje, derivadas de su geomorfología. La morfometría permitió comparar unidades hidrológicas a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales, alcanzando

⁷ <http://www.geointa.inta.gob.ar/>

⁸ <http://floodobservatory.colorado.edu/GlobalFloodplains>

conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio (Senisterra *et al*, 2014; Montealegre Medina, 2017).

Para el cálculo de variables hidrológicas en la cuenca de estudio se utilizó el complemento GeoQ para QGis, que representa un modelo matemático de la relación precipitación, escorrentía superficial, infiltración y abstracciones iniciales originadas por una tormenta, considerando las características de uso y cobertura del suelo y las texturas edáficas presentes. Esta herramienta geoespacial, fue desarrollada durante el desarrollo de esta tesis, aplica la metodología del Número de Curva (NC), que es un método empírico ampliamente utilizado para la estimación de la transformación lluvia-escorrentía, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Esta funcionalidad permitió superar las limitaciones que podrían presentar otros modelos hidrológicos tradicionales al facilitar la incorporación de información espacial detallada y el procesamiento automatizado de los datos. La herramienta GeoQ, tal como lo señalan Montealegre Medina y Gaspari (2021), se presenta como una solución pertinente y de código abierto para el análisis hidrológico espacial en el contexto de la gestión de cuencas y conforma en el repositorio de QGis y GitHub⁹.

Los resultados obtenidos de la modelización con GeoQ fueron un insumo fundamental para la posterior evaluación y zonificación de la vulnerabilidad hidrológica en la cuenca de estudio. Es importante destacar que, si bien GeoQ se basa en una metodología robusta y ha demostrado generar información acertada en estudios previos, sus resultados específicos se evaluaron en etapas posteriores en el desarrollo de la tesis, integrándolos a estudios realizados por la implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6.6.1. (UNEP, 2020a)

La integración y análisis de los cambios en la extensión de los ecosistemas acuáticos del ODS 6.6.1 permitió conformar una base cartográfica para conformar un apoyo potencial a identificar tendencias a largo plazo y evaluar posibles impactos del cambio ambiental y las actividades humanas en la disponibilidad y la salud de los recursos hídricos, como lo expresa UNEP (2020b).

La información obtenida del análisis del indicador ODS 6.6.1 se integró al SIG, para facilitar su visualización, análisis y procesamiento geoespacial y cruce con otros conjuntos de datos relevantes, como modelos digitales de elevación, información de cobertura terrestre y datos socioeconómicos. Los datos de extensión máxima de agua superficial, derivados del monitoreo del ODS 6.6.1, actuaron como una entrada valiosa para la zonificación de la vulnerabilidad hidrológica, ayudando a delimitar las áreas propensas a la acumulación de agua.

La información y los procesos descritos han sido insumos para detectar y analizar la dinámica hídrica y el comportamiento del agua en la zona de estudio, para plantear indicadores de vulnerabilidad, los cuales relacionen las características intrínsecas de la cuenca A1.

La definición y el manejo de indicadores se basó en la metodología propuesta por Wilches-Chaux (1989) que establece definir una tipología para la formulación de índices cualitativos / cuantitativos, que permitan identificar los cambios en las variables. Estos indicadores se construyeron a partir de la información geográfica mencionada (imágenes de satélite, información vectorial y raster de datos meteorológicos, de cobertura vegetal, edáfica, etc.), observaciones a campo e información secundaria (bibliográfica y cartográfica). El procesamiento geoespacial de dicha información generó la zonificación de la vulnerabilidad hidrológica para eventos extremos de excesos hídricos por medio de geoprosesamientos espaciales con herramientas SIG. Los resultados de esta tesis aportan bases sólidas

⁹ <https://github.com/fabalmon/GeoQ>

disponibles para una potencial generación de escenarios que contemplen la vulnerabilidad hidrológica, para evaluar y visualizar diversas causas y efectos en la zona de estudio, provenientes de eventos hidrológicos extremos.

El procedimiento metodológico e integrador de esta tesis, para definir la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos, basado en indicadores, se resume en la Figura 1.2.



Figura 1.2 Metodología para zonificar la vulnerabilidad hidrológica en una cuenca.

A continuación, se presenta el desarrollo de la tesis por capítulo donde se describen los materiales y métodos aplicados, resultados y discusión lograda, y conclusiones alcanzadas para cada uno. Por último, se presenta una conclusión integradora.

Durante el desarrollo de esta tesis, se generaron publicaciones en revistas científicas y en congresos de la especialidad, como se describe en cada capítulo, y como mencionan De Certau (1999) y Gómez Nashiki *et al.* (2014) publicar representa poner en práctica una serie de conocimientos y habilidades que conjuntan, por una parte, dar cuenta del proceso seguido mediante la tarea de la investigación y, por otra, exponer los resultados de esa actividad en un ámbito que se constituye por pautas y reglas específicas. Dentro de las actividades de investigación desarrolladas, la publicación constituyó así un

hito fundamental del proceso de indagación, al materializar y validar los resultados alcanzados y contribuir a la finalización formal del trabajo doctoral.

1.6 Bibliografía

Agarwal, C. S. (1998). Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district, U.P. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(4), 169-175.

<https://doi.org/10.1007/BF02990795>

Aldardasawi, A. F. M., & Eren, B. (2021). Floods and their impact on the environment. *Academic Perspective Procedia*, 4, 42-49. <https://doi.org/10.33793/acperpro.04.02.24>

Anandhi, A., & Kannan, N. (2018). Vulnerability assessment of water resources – Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. *Journal of Hydrology*, 557, 460–474.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032>

Aragón, R., Jobbágy, E. G., & Viglizzo, E. F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), 433-447.

<https://doi.org/10.1002/eco.149>

Banco Mundial. (2021, 29 de junio). *Impactos de las crisis climáticas en la pobreza y la macroeconomía en la Argentina* [Comunicado de prensa].

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/29/banco-mundial-argentina-pierde-unos-1000-millones-dolares-anuales-por-inundaciones>

Barros, V. R., Boninsegna, J. A., Camilloni, I. A., Chidiak, M., Magrín, G. O., & Rusticucci, M. (2015). Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation. *WIREs Climate Change*, 6(2), 151-169. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>

Bárbulescu, A. (2025). Climate change and hydrological processes (2nd ed.). *Water*, 17(20), Artículo 2943. <https://doi.org/10.3390/w17202943>

Beguiría Portugués, S. (2002). Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. En A. C. Cuadrat, S. M. Vicente, & M. A. Saz (Eds.), *La información climática como herramienta de gestión ambiental* (pp. 83-92). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.

Berrick, S. W., Leptoukh, G., Farley, J. D., & Rui, H. (2009). Giovanni: A web service workflow-based data visualization and analysis system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 106–113. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2003183>

Bijekar, S., Gupta, A., & Sharma, R. (2024). Water resource mapping, monitoring, and modeling using geospatial approaches. En S. B. Vattikuti, L. S. D. Kumar, R. P. D. Sharma, P. K. L. Goud, & S. K. D. R. Singh (Eds.), *Spatio-temporal analysis of water resource using geospatial techniques* (pp. 1-15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23665-5.00025-9>

- Borah, S. B., Sivasankar, T., Ramya, M. N. S., & Raju, P. L. N. (2018). Flood inundation mapping and monitoring in Kaziranga National Park, Assam using Sentinel-1 SAR data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), Artículo 520. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6893-y>
- Borzi, G., Roig, A., Tanjal, C., Santucci, L., Tejada Tejada, M., & Carol, E. (2021). Flood hazard assessment in large plain basins with a scarce slope in the Pampean Plain, Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Artículo 177. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08988-1>
- Brakenridge, G. R., Anderson, E., Kettner, A. J., Slayback, D., & Policelli, F. (2015). *Global atlas of floodplains*. Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado. <http://floodobservatory.colorado.edu/>
- Cáceres Callo, K. A., & Ataucuri Enriquez, R. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad hidrológica del tramo de la carretera Interoceánica comprendido entre el km 12+000 al km 14+000 en la variante de Uchumayo Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4712>
- Cárdenas, M. F., & Tobón, C. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad biofísica de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático: Una aproximación conceptual y metodológica. *Gestión y Ambiente*, 19(1), 166-178. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/54383>
- Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., & Blöschl, G. (2022). Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 13, Artículo 5136. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>
- Chatrabhuj, Meshram, K., Mishra, U., & Omar, P. J. (2024). Integration of remote sensing data and GIS technologies in river management system. *Discover Geoscience*, 2, Artículo 67. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00080-8>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- Chowdary, V. M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Krishna Murthy, Y. V. N., Sharma, J. R., & Dadhwal, V. K. (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic hierarchy process technique and GIS. *Water Resources Management*, 27(10), 3555-3571. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0364-6>
- Committee on Earth Observation Satellites [CEOS]. (2022). *SDG indicator 6.6.1 – EO support sheet*. https://ceos.org/sdg/files/supportsheets/SDG_6.6.1_EO_Satellite%20Data%20Requirements.pdf
- Confederación de Asociaciones Rurales de Buenos Aires y La Pampa [CARBAP]. (2025). *Una cuenca estratégica, un plan viable y una deuda pendiente del Estado argentino*. https://carbap.org/wp-content/uploads/2025/06/El-Salado_estado-de-situacion.pdf
- De Abelleira, D., Verón, S. R., Banchemo, S., Iturralde Elortegui, M. R., Zelaya, D. K., Murray, F., Martini, J. P., Valiente, S. O., Puig, O., Propato, T. S., Ferraina, A., Maidana, D. A., Portillo, J. E., Franzoni, A., Pezzola, N. A., Winschel, C. I., Muñoz, S., Meza, J., Kurtz, D. B., & Sapino, V. (2021). *Mapa nacional de cultivos. Campaña 2020/2021* [Informe técnico]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8286318>
- De Certeau, M. (1999). *La invención de lo cotidiano: 1. Artes de hacer* (A. Pescador, Trad.). Universidad Iberoamericana/ITESO.

Díaz Gómez, A. R. (2015). *Análisis de la vulnerabilidad a cambios climáticos y de uso del territorio de las cuencas hidrológicas del faldeo oriental de la sierra del Aconquija y del Sudoeste, Tucumán* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Tucumán]. Repositorio Institucional UNT.

Díaz Gómez, A. R., Gaspari, F. J., & Georgieff, S. M. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 3-19.

<https://www.lillo.org.ar/journals/index.php/acta-geologica-lilloana/article/view/v29n1a01>

Dornes, P., Mariño, E., & Schulz, C. (2015). *Inventario de los recursos hídricos de la provincia de La Pampa*. UNLPam-Consultora. <https://koha.unlpam.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=40269>

Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam Mba, W., Rosenfeld, D., Tierney, J., & Zolina, O. (2021). Water cycle changes. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1055–1210). Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., & Bazzi, H. (2017). Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for operational soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural areas. *Remote Sensing*, 9(12), Artículo 1292. <https://doi.org/10.3390/rs9121292>

Entraigas, I., Vercelli, N., & Fajardo González, L. F. (2019). Plant communities along preferential superficial water flow paths across a floodplain landscape. *Ecohydrology*, 12(6), Artículo e2124. <https://doi.org/10.1002/eco.2124>

Espinosa Marín, J. A. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad hídrica de una cuenca del Río El Ángel y demanda de agua de la población en escenarios de cambio de uso de suelo* [Tesis de maestría, Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/2123>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), Artículo RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Galván, L. (2014). *Análisis y ajuste de modelos digitales de elevaciones en la región central de la Argentina: Integración de modelos geopotenciales e información altimétrica local* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/43457>

García, P. E., Badano, N. D., Menéndez, Á. N., Bert, F., García, G., Podestá, G., Rovere, S., Verdin, A., Rajagopalan, B., & Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92-106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>

García-Hidalgo, Y. (2017). Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del río Naranjo, Cuba. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 315-330. <https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.13>

- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., & Montealegre Medina, F. A. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1), 74-112. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-03>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGM DOMUS*, 4, 143–158. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354>
- Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: Correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>
- Gómez, M. E., Perdomo, R. A., & Del Cogliano, D. (2006). Modelo de geoide en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. *GEOACTA*, 31, 101–108. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/133820>
- Gómez Nashiki, A., Jiménez García, S. A., & Moreles Vázquez, J. (2014). Publicar en revistas científicas: Recomendaciones de investigadores de ciencias sociales y humanidades. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 19(60), 155–185. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-66662014000100008&lng=es
- Graham, S. T., Parkinson, C., & Chahine, M. (2010). *The water cycle*. NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Water>
- Guerra, L. C., García, A. R., Noretto, M. D., Vázquez Amábile, G. G., & Jobbágy, E. G. (2024). Hydrological changes in a plain basin in central Argentina following expansion of rainfed agriculture and climate change. *Ecohydrology*, 17(4), Artículo e2679. <https://doi.org/10.1002/eco.2679>
- Guzmán, A. C., De Antueno, L., & Gaspari, F. J. (2021). Análisis de la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca alta del Río Sauce Chico, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 120(1), Artículo 069. <https://doi.org/10.24215/16699513e069>
- Hattermann, F. F., Krysanova, V., Gosling, S. N., Dankers, R., Daggupati, P., Donnelly, C., Flörke, M., Huang, S., Motovilov, Y., Buda, S., Yang, T., Müller, C., Leng, G., Tang, Q., Portmann, F. T., Hagemann, S., Gerten, D., Wada, Y., Masaki, Y., ... Stacke, T. (2017). Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Climatic Change*, 141(3), 561-576. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1829-4>
- Hattermann, F. F., Vetter, T., Breuer, L., Su, B., Daggupati, P., Donnelly, C., Fekete, B., Flörke, M., Gosling, S. N., Hoffmann, P., Liersch, S., Masaki, Y., Motovilov, Y., Müller, C., Samaniego, L., Stacke, T., Wada, Y., Yang, T., & Krysanova, V. (2018). Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: A cross-scale study. *Environmental Research Letters*, 13(1), Artículo 015006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), Artículo 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>

- Hernández Atencia, Y., Peña Rojas, L. E., & Muñoz Ramos, J. (2024). Evaluación de la vulnerabilidad física ante inundaciones bajo escenarios de cambio del uso del suelo. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.2149>
- Houspanossian, J., Giménez, R., Whitworth-Hulse, J. I., Nosetto, M. D., Tych, W., Atkinson, P. M., Rufino, M. C., & Jobbágy, E. G. (2023). Agricultural expansion raises groundwater and increases flooding in the South American plains. *Science*, 380(6652), 1344-1348. <https://doi.org/10.1126/science.add5462>
- 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>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19713>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014a). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014b). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.).
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-4/>
- International Network of Basin Organizations [INBO] & Global Water Partnership [GWP]. (2009). *A handbook for integrated water resources management in basins*. <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/a-handbook-for-integrated-water-resources-management-in-basins-inbo-gwp-2009-spanish.pdf>
- Jarihani, A. A., Callow, J. N., McVicar, T. R., Van Niel, T. G., & Larsen, J. R. (2015). Satellite-derived digital elevation model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. *Journal of Hydrology*, 524, 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600.
- Kruse, E. E., & Zimmermann, E. D. (2002). Hidrogeología de grandes llanuras: Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). En *Workshop on Groundwater and Human Development, XXXII IAH Congress* (pp. 2025–2038). Mar del Plata, Argentina.
- Kruse, E., & Ainchil, J. (2017). Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: Caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *AUGM DOMUS*, 9, 1-11. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/2482>
- Kuppel, S., Houspanossian, J., Nosetto, M. D., & Jobbágy, E. G. (2015). What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research*, 51(4), 2937-2950. <https://doi.org/10.1002/2015WR016966>

- Marshall, S. R. O., & Tran, T. N. D. (2025). Integrating artificial intelligence and machine learning in hydrological modeling for sustainable resource management. *International Journal of River Basin Management*. Avance de publicación en línea. <https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2478280>
- Martz, L. W., & Garbrecht, J. (1992). Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 18(6), 747–761. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(92\)90007-E](https://doi.org/10.1016/0098-3004(92)90007-E)
- Meadows, M. E., & Wilson, M. (2021). A comparison of machine learning approaches to improve free topography data for flood modelling. *Remote Sensing*, 13(2), Artículo 275. <https://doi.org/10.3390/rs13020275>
- Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica. https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1
- Montealegre Medina, F. A. (2017). *Evaluación espacio temporal de la productividad agrícola con índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) como herramienta para el ordenamiento territorial. Caso de estudio: Cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires, Argentina* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. SEDICI. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/62794>
- Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021). GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGIS®. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 9(2), 170–192. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1289>
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Müller, G. V., Lovino, M. A., & Sgroi, L. C. (2021). Observed and projected changes in temperature and precipitation in the core crop region of the humid Pampa, Argentina. *Climate*, 9(3), Artículo 40. <https://doi.org/10.3390/cli9030040>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Gorooh, V. A., Shearer, E. J., Sadeghi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., Bolvin, D., & Ralph, M. F. (2020). PERSIANN Dynamic Infrared–Rain Rate (PDIR-Now): A near-real-time, quasi-global satellite precipitation dataset. *Journal of Hydrometeorology*, 21(12), 2893–2908. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0177.1>
- Patel, R. K., Soni, P., & Singh, P. (2025). Advances in remote sensing and GIS applications in watershed hydrology: A systematic review. *Journal of Hydrology*, 652, Artículo 134459. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134459>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Rainhart, L., Peinetti, H. R., & Noellemeyer, E. J. (2024). Las inundaciones de las últimas tres décadas en la Pampa Interior y su relación con la pluviometría regional. *Ecología Austral*, 34(1), 121–133. <https://doi.org/10.25260/EA.24.34.1.0.2374>

- Rodríguez, C. I., & Jacinto, G. P. (2017). Recursos hídricos: Calidad y procesos de gestión en la región pampeana argentina. *Luna Azul*, 44(1), 59–79. <https://doi.org/10.17151/luaz.2017.44.5>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Sala, J. M., & Benítez, A. F. (1993). *Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires. Zona Noroeste*. Consejo Federal de Inversiones. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/65651>
- Sala, J. M., González, N., & Kruse, E. (1983). Generalización hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. En *Actas del Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras* (pp. 973–1009). Comité Nacional para el Programa Hidrológico Internacional / PHI-UNESCO.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Müller Schmied, H., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., Sun, A., Taylor, R. G., Villholth, K. G., Vörösmarty, C. J., & Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca [SAGyP] & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. (1989). *Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires* (Escala 1:500.000) [Proyecto PNUD ARG/85/019]. <https://searchworks.stanford.edu/view/2116475>
- Senisterra, G., Rodríguez Vagaría, A., Gaspari, F., & Mazzucchelli, G. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del Arroyo Napaleofú, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(2), 287-303. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/39614>
- Singh, P., Thakur, J. K., & Singh, U. C. (2013). Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 68(7), 1967-1977. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1884-8>
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. (Eds.). (2002). *Mathematical models of large watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270))
- Soriano, A., León, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R. S., Deregibus, V. A., Cauhépé, M. A., Scaglia, O. A., Velázquez, C. A., & Lemcoff, J. H. (1992). Río de la Plata grasslands. En R. T. Coupland (Ed.), *Ecosystems of the world: Vol. 8A. Natural grasslands. Introduction and Western Hemisphere* (pp. 367-407). Elsevier.
- Thakur, J. K., Singh, S. K., & Ekanthalu, V. S. (2017). Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling. *Applied Water Science*, 7(4), 1595–1608. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0384-5>
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2020a). *Change in the extent of water-related ecosystems over time: Methodology for SDG Indicator 6.6.1*. https://files.habitatseven.com/unwater/SDG-indicator-661-methodology_Spanish.pdf
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2020b). *Measuring change in the extent of water-related ecosystems over time: Step-by-step monitoring methodology for SDG Indicator 6.6.1* (Versión

2.0). UN-Water. https://www.unescwa.org/sites/default/files/inline-files/SDG-indicator-661-methodology_English.pdf

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2021). *Progress on water-related ecosystems – 2021 update*. <https://www.unep.org/resources/publication/progress-water-related-ecosystems-2021-update>

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2022). *SDG indicator 6.6.1a metadata*. <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-06-06-01a.pdf>

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2024). *Progress on water-related ecosystems: Mid-term status of SDG indicator 6.6.1 and acceleration needs with a special focus on biodiversity*. <https://www.unwater.org/publications/progress-water-related-ecosystems-2024-update>

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2025). *Sustainable watershed management*. <https://www.unep.org/topics/fresh-water/water-resources-management/watershed-management>

van der Ent, R. J., & Tuinenburg, O. A. (2017). The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 779-790. <https://doi.org/10.5194/hess-21-779-2017>

Varni, M., Barranquero, R. S., & Zeme, S. (2019). Groundwater and surface water interactions in flat lands: The importance of ecological and flow regulation perspectives. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1791–1801. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00334-1>

Vieux, B. E. (2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS* (2nd ed., Vol. 48). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2460-6>

Viglizzo, E. F., Lértora, F., Pordomingo, A. J., Bernardos, J. N., Roberto, Z. E., & Del Valle, H. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1-2), 65-81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00155-9)

Wada, Y., Bierkens, M. F. P., de Roo, A., Dirmeyer, P. A., Famiglietti, J. S., Hanasaki, N., Konar, M., Liu, J., Müller Schmied, H., Oki, T., Pokhrel, Y., Sivapalan, M., Troy, T. J., van Dijk, A. I. J. M., van Emmerik, T., Van Huijgevoort, M. H. J., Van Lanen, H. A. J., Vörösmarty, C. J., Wanders, N., & Wheeler, H. (2017). Human–water interface in hydrological modelling: Current status and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 4169–4193. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>

Water Diplomat. (2024, 4 de octubre). *Three SDG 6 indicator progress reports highlight degradation in water related ecosystems*. <https://www.waterdiplomat.org/story/2024/10/three-sdg-6-indicator-progress-reports-highlight-degradation-water-related-ecosystems>

Wilches-Chaux, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional: Herramientas para la crisis*. Servicio Nacional de Aprendizaje. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/1034>

2 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN: CORRECCIONES ALTIMÉTRICAS PARA USO HIDROLÓGICO EN ÁREAS DE LLANURA¹⁰

2.1 Introducción

La dinámica temporal y espacial de una cuenca hidrográfica es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación y está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari *et al.*, 2010).

La representación del movimiento del agua sobre el terreno hacia los cauces se genera a partir de la aplicación de modelos cartográficos con mapas topográficos en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG) y algunos modelos hidrológicos e hidráulicos.

Los modelos hidrológicos son una herramienta útil para la evaluación y análisis de los recursos hídricos. Constan de entradas y salidas que consisten en variables hidrológicas mensurables conectadas por medio de ecuaciones (Chow *et al.*, 1994). Al ser una representación incompleta de la realidad, se debe definir de manera clara el objetivo para el cual es aplicado, la exactitud de la respuesta a las simulaciones y las variables de entrada que utiliza (según disponibilidad de base datos, costo y tiempo para su relevamiento).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas (Gaspari *et al.*, 2010), aportando los datos básicos para los modelos hidrológicos. Al mismo tiempo, pueden proporcionar conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Henao, 1988), como así también, la estimación de variables hidrológicas asociadas que permitan evaluar procesos y eventos extremos (inundaciones, sequías, desertificación). Estos últimos son temas de primer orden en la gestión y administración del territorio, cuya inclusión en la agenda política conducen a la toma de decisiones inteligentes sobre un espacio determinado.

Otra herramienta de importancia en la modelización hidrológica es la observación remota de la superficie terrestre que constituye el marco de estudio de la teledetección. En sentido amplio, la teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación (Chuvieco, 2002). La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) que se emplea cada día con mayor asiduidad para la captura tanto de información temática (medioambiental), como de información topográfica (modelo digital de elevación, planimetría) (Arozarena *et al.*, 1989). De acuerdo con Díaz *et al.* (2010), la teledetección espacial es una importante fuente de datos para derivar a un MDE.

El uso conjunto de sistemas de proyección cartográfica, integrados en un SIG, es relativamente confiable, debido a la eficacia y exactitud espacial que le otorga al uso de bases de datos geográficos. Estos modelos se han transformado en una herramienta de análisis espacial que permite explorar los

¹⁰ Publicado en: Gómez, M. E.; Gaspari, F.J.; Perdomo, R.A.; Simontacchi, L.E.; Montealegre Medina, F.A.; Rodríguez Vagaría, A.M.; Tavarone, M.F. & Senisterra, G.E. (2017). Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. Acta Geológica Lilloana 29 (1): 39–51. On-line ISSN 1852-6217. Impresa ISSN 0567-7513. Con referato. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>

mecanismos hidrológicos, ambientales y socioeconómicos que utilizan parámetros simples/complejos. También permiten visualizar patrones, relaciones y tendencias de los cambios espacio - temporales, proporcionando una perspectiva dinámica de la información para la toma de decisiones tendientes al ordenamiento territorial. Por tal razón, al realizar procesos de ajuste a la información base con datos tomados en campo, considerando las características particulares de una zona de llanura, es posible ajustar con mayor precisión los resultados y la información topográfica e hidrológica de la cuenca hidrográfica.

En el caso de áreas llanas, se presenta la situación de que los mapas topográficos no siempre coinciden con los mapas hidrológicos debido a su poco gradiente de pendiente y las geoformas presentes, generando interpretaciones erróneas de la dirección de los flujos superficiales y por ende la delimitación de las cuencas por divisorias de aguas.

Para resolver esta situación se aplican metodologías de ajuste de cotas en un modelo digital de elevación (MDE) por medio de la combinación de datos topográficos con hidrográficos. Las cotas provistas por un MDE de cobertura global obtenido por teledetección están afectadas no sólo por errores propios de la técnica con la que se obtienen, sino también presentan, entre otros, diferencias de tipo sistemática como el origen de las mismas alturas (Rodríguez *et al.*, 2005). En el mejor de los casos, estas diferencias de origen resultan constantes siendo su corrección inmediata, sin embargo, en otros casos es variable. Esta variabilidad si bien puede aumentar hacia zonas montañosas, también puede estar presente en zonas llanas lo cual agrega complejidad al estudio hidrológico (Díaz *et al.*, 2010).

Una manera de controlar estas diferencias es a través de puntos con información geodésica (Rodríguez *et al.*, 2006). Estos permiten estimar los apartamientos entre las alturas derivadas de un MDE global y las observadas, como también el origen de los mismos. Las alturas obtenidas con esta técnica carecen de significado físico por lo que su reducción a alturas ortométricas o de tipo físico, requiere de un modelo de geoide el cual tiene relación con la distribución de masas topográficas. Cuánto mejor sea este modelo, mejor será la determinación de la topografía. Es importante mencionar que en la obtención de alturas derivadas de interferometría radar, como en otras técnicas (Lidar, fotogrametría, etc.), siempre interviene el posicionamiento con GPS (Global Positioning System).

Los modelos y la metodología que se presentan a continuación tienen por objetivo la definición de un sistema de drenaje superficial en una cuenca de llanura a partir del MDE global ajustado geodésicamente.

2.2 Materiales y métodos

El área en estudio fue la subregión A1 de la cuenca del Río Salado en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (MOSP, 1999). La Figura 2.1 muestra el límite de la subregión A1 que abarca una superficie de 12.427,81 km² según el PMRS, distribuida sólo en la provincia de Buenos Aires. También se presenta la delimitación completa de la Cuenca del Río Salado definida por el grupo de investigadores para el presente trabajo.

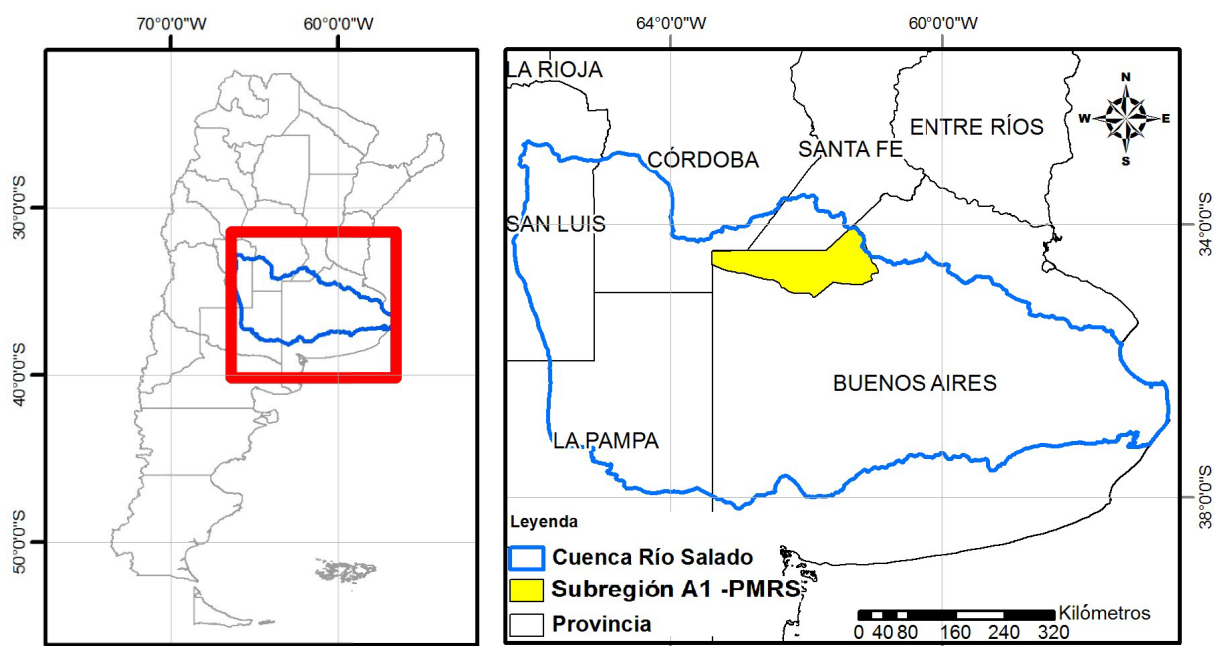


Figura 2.1 Ubicación de la subregión A1 según PMRS y la cuenca del Río Salado completa, en Argentina.

La metodología aplicada se basó en cuatro etapas, donde se planteó una secuencia que se inicia con el procesamiento de datos de cartografía base topográfica con herramientas SIG, hasta la definición de áreas inundables con imágenes satelitales.

2.2.1 Cartografía base antecedente: El MDE e hidrografía

Para el análisis de la topografía se consideró el modelo digital de elevaciones SRTM90 v.4, obtenido del sitio del Consorcio de Información Espacial (Consultative Group for International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information - CGIAR-CSI) que ha sido pionero en la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos (RS) para el desarrollo agrícola sostenible por más de una década (CGIAR-CSI, 2004).

El SRTM90 fue obtenido a partir de la misión Shuttle Radar Topography (SRTM). Se trata del MDE de más alta resolución de la superficie terrestre con tecnología radar, con una resolución de 30 m para Estados Unidos y 90 m para el resto del mundo (Farr *et al.*, 2007). Este modelo constituye una grilla con cobertura global de alturas ortométricas referidas al geoide del modelo geopotencial global EGM96 (Lemoine *et al.*, 1998). Las alturas del SRTM90 tienen un error nominal de 16 m, pero en regiones llanas, como la provincia de Buenos Aires, este error puede ser inferior, llegando a los 3 m (Galván, 2014).

La cartografía base del sistema de drenaje se obtuvo a partir de capas temáticas de acceso libre en la web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de la Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA) (Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina, 2007) que publica datos, productos y servicios de información geoespacial, de manera eficiente y oportuna, como un aporte fundamental a la democratización del acceso a la información producida por el Estado y diversos actores. Esta capa de información representa los cuerpos de agua y drenajes superficiales georreferenciados. La misma fue procesada con el programa ArcGIS 10 ® para definir y caracterizar

morfométricamente la cuenca. El límite de la subregión A1 utilizado de base es el definido por el PMRS (MOSP, 1999).

2.2.2 Corrección altimétrica.

2.2.2.1 Observaciones de GPS/nivelación.

Con el objeto de calibrar y mejorar el modelo SRTM90 en la región en estudio, se realizaron campañas de observación GPS sobre 11 puntos de nivelación pertenecientes a la red altimétrica del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Parte de estos puntos se ubican en el sur de la provincia de Santa Fe y sus observaciones fueron tomadas con equipos GPS geodésicos de doble frecuencia. El procesamiento se realizó en modo diferencial y las coordenadas finales están referidas al marco de referencia nacional Posiciones Geodésicas Argentinas 2007 (POSGAR 07) (Instituto Geográfico Nacional, 2009). Las alturas geodésicas (h) obtenidas tienen un error del orden de los 3 cm, producto del marco de referencia y la metodología empleada, que permite integrar estas observaciones a la existente en la región. Esta última forma parte de los trabajos de Gómez *et al.* (2006) y Perdomo *et al.* (2012), los que aportan información del mismo tipo sobre el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Se tiene entonces un total de 65 puntos con datos de GPS y nivelación, de los cuales 25 se ubican en la cuenca A1. La incorporación de estos puntos brinda robustez a la determinación de las diferencias al mismo tiempo que garantiza la continuidad de las mismas entre la provincia de Buenos Aires y el sur de Santa Fe.

Las mediciones GPS sobre puntos de nivelación, permiten obtener lo que se conoce como ondulación geoidal (N) mediante la ecuación de Heiskanen y Moritz (1967) (Ecuación 2.1) donde expresan que, siendo H , la altura ortométrica, entonces:

$$N = h - H \quad \text{Ecuación 2.1}$$

En el presente estudio, al tratarse de observaciones directas sobre puntos de la red de nivelación argentina, las alturas ortométricas están vinculadas a la referencia altimétrica nacional (OIGN), a diferencia de las alturas derivadas del SRTM90. Esta ecuación es de fundamental importancia para corregir el modelo SRTM.

2.2.2.2 Ajuste por puntos de nivelación

Las alturas del SRTM90 no están vinculadas a la referencia altimétrica argentina, y considerando que cualquier obra hidráulica o análisis hídrico debe realizarse en base a alturas vinculadas a la referencia nacional (OIGN), se planteó que con la ecuación de Heiskanen y Moritz (1967) se definen las alturas del SRTM90 para Argentina según la Ecuación 2.2.

$$H_{srtm} = h - N_{egm96} \quad \text{Ecuación 2.2.}$$

Siendo H_{srtm} , la altura ortométrica referida al geoide del EGM96 definida por h (altura geodésica, que se obtiene con GPS) y por N_{egm96} que es la ondulación geoidal proporcionada por el modelo EGM96.

De la Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2, se desprende que la corrección a las alturas del SRTM se puede obtener aplicando la diferencia Negm96-Nobs, correspondiendo Nobs a las ondulaciones geoidales observadas, es decir, obtenidas a partir de datos de campo. Teniendo en cuenta que la resolución del SRTM es de 90 m, las correcciones arriba mencionadas se aplicaron a partir de una grilla cuya cobertura y resolución son las mismas que para el SRTM en su versión original.

La aplicación de este procedimiento dio lugar al SRTM corregido (en adelante, SRTMc).

2.2.2.3 Comprobación del sistema de drenaje con SRTMc

La capa vectorial utilizada fue la hidrografía (cursos y cuerpos de agua), referenciada en coordenadas geográficas en el Sistema WGS 84, Marco de Referencia POSGAR 07. A partir de esta capa se aplicó la herramienta de Arc Hydro Tools, que analiza los MDE permitiendo estimar variables que aumentan la eficiencia en el procesamiento de los modelos geospaciales, la efectividad y la precisión del estudio aplicados a la simulación hidrológica. Esta herramienta es de carácter geoespacial y temporal, desarrollada por el Centro de Investigaciones en recursos de agua de la Universidad de Texas, Estados Unidos, bajo entorno de ArcGIS® (Environmental Systems Research Institute, 2011).

El procesamiento con Arc Hydro se aplicó al SRTMc para identificar el patrón de drenaje superficial y sus derivados, que se utilizaron para la delineación eficiente de los límites rectificados de la cuenca hidrográfica A1 y la generación de redes de flujo. También se aplicaron para derivar varios conjuntos de datos que describieron colectivamente los patrones de drenaje de la subcuenca. El análisis ráster se realizó para generar datos sobre la dirección del flujo, la acumulación de flujo, la definición de cursos de agua corregidos y definición de cuerpos de agua, como ser lagunas.

La comprobación de la distribución geoespacial se realizó aplicando las capas vectoriales del sistema de drenaje generado por el IGN sobre los cursos de agua corregidos.

2.2.2.4 Integración de información de inundaciones

A partir de la identificación y delimitación de las lagunas con el SRTMc, se planteó integrar a este nuevo límite las modificaciones en tamaño espacio temporal que se producen por el efecto de situaciones extremas, como ser el caso de inundación y sequía. Para ello se definieron fechas que representen estas dos situaciones hidrológicas en la A1, a partir del análisis de series históricas de precipitaciones diarias entre 2012 y 2015, con datos otorgados por el Servicio Meteorológico Nacional para la estación Junín (SMN, com. pers.) Estas situaciones hidrológicas caracterizan tres estadios: sequía, inundación y estado intermedio.

Estos tres estadios climáticos se contrastaron con los datos del monitoreo diario del agua de la superficie terrestre, disponible en el Observatorio de Inundaciones Dartmouth (Dartmouth Flood Observatory, DFO) de la Universidad de Colorado (USA). Esta base de datos internacional otorga información espacial para la detección de inundaciones, la respuesta a inundaciones, la evaluación de riesgos futuros y la investigación hidrológica, siendo base de un proyecto de Ciencias Aplicadas de la NASA para ayudar al Programa Mundial de Alimentos (2013-2017), (Dartmouth Flood Observatory, 1993). Este monitoreo diario permite determinar límites entre agua y suelo, y detectar presencia de agua superficial a partir de la interpretación de información de Terra-MODIS y Aqua-MODIS, disponible en el sitio web del DFO.

Otra herramienta utilizada fue Google Earth © que proporciona imágenes de distinta época para una misma región, y a partir de éstas se analizaron los límites de la ocupación de los cuerpos de agua para las mismas fechas estudiadas, con el fin de identificar y corroborar el monitoreo DFO.

Por último, se realizó un diagnóstico de las variaciones entre la superficie de ocupación de cuerpos de agua definidos como bañados, considerando que son tierras bajas, inundables, cercanas a ríos, arroyos o lagunas.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Cartografía base antecedente: el MDE y el sistema de drenaje.

En la Figura 2.2 se presenta la base cartográfica con la delimitación de la subregión A1 planteada por el PMRS y de las capas temáticas de referencia con información hidrográfica de la cartografía oficial producida por el IGN, en el SIG250 (IGN, s.f.).

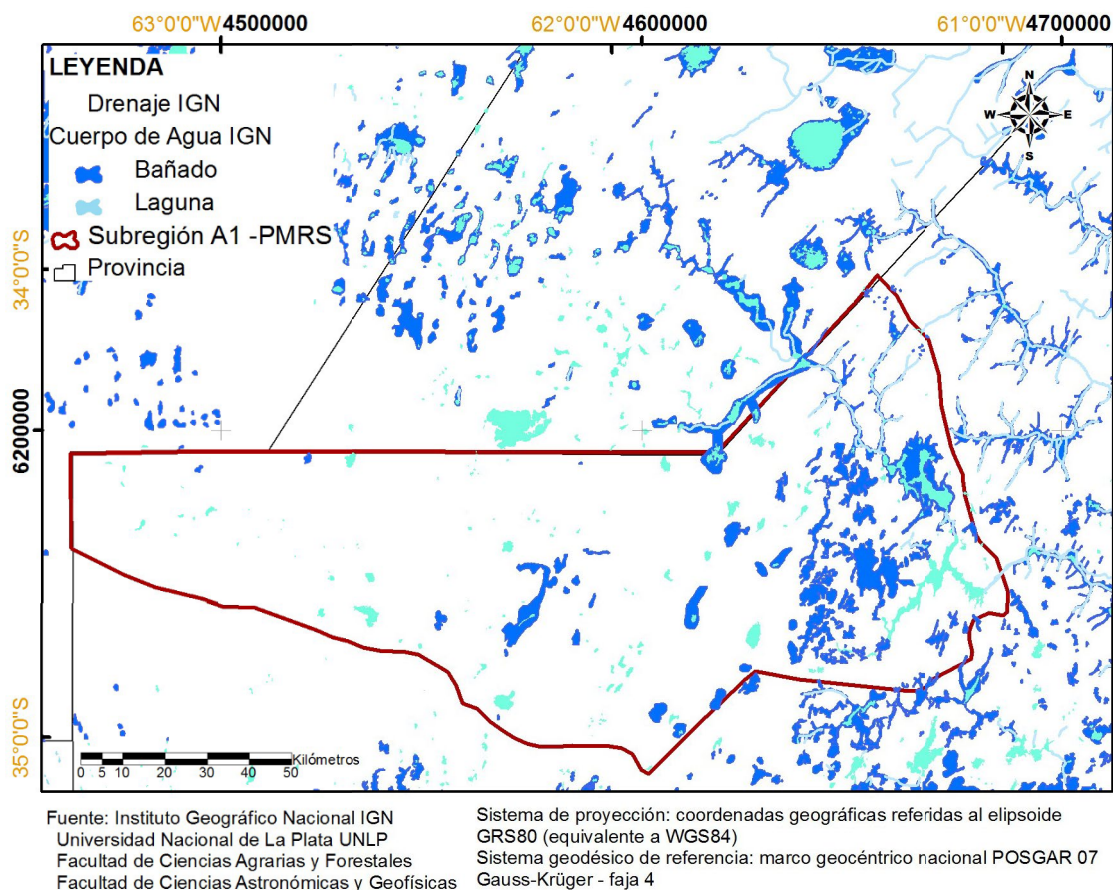


Figura 2.2 Ubicación de la subregión A1 según PMRS y sistema de drenaje superficial del IGN. Fuente: Adaptado de Gómez *et al.* (2017).

El análisis de la topografía con el SRTM90 v.4, permitió definir a partir de la subregión A1 a la unidad hidrológica cuenca A1. Esta información aportó para la corroboración de los cursos de agua superficiales para plantear el comportamiento del agua y la composición de las cuencas.

2.3.2 Corrección altimétrica.

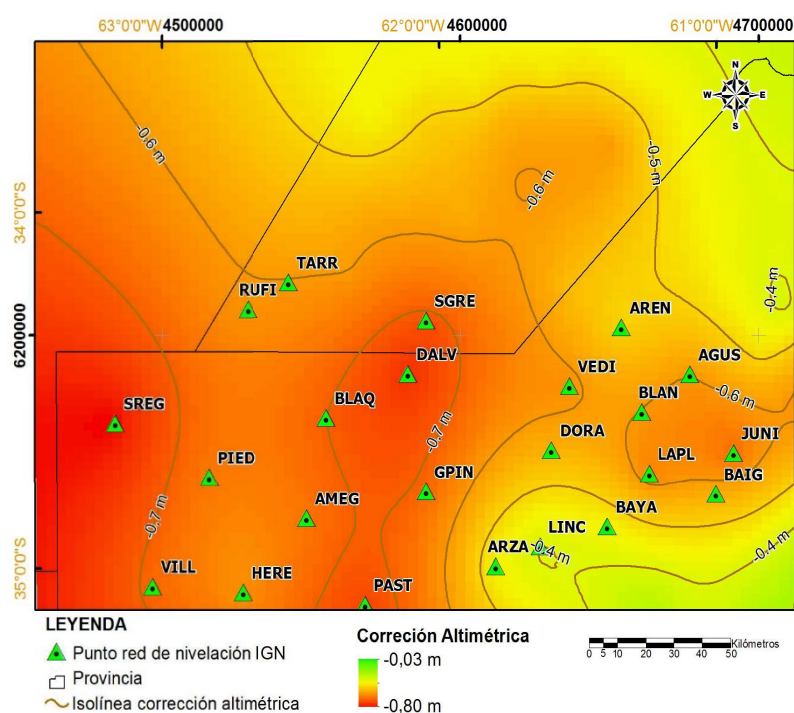
2.3.2.1 Observaciones de GPS/nivelación.

La estadística de las diferencias entre las alturas del SRTM90 y las de la red de nivelación (HIGN), arrojan un desvío estándar de 1,62 m, con un promedio de 1,11 m en el sentido (Hsrtm- HIGN). Estos valores fueron obtenidos sobre los 65 puntos localizados entre el noroeste de la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe.

Si se analizan las diferencias entre las ondulaciones derivadas del EGM96 y las ondulaciones observadas en la cuenca A1 sobre los 25 puntos que se ubican en la misma, se tiene un desvío estándar de 0,10 m y un promedio de -0,62 m en el sentido (Negm96 -Nobs). Estos valores son idénticos a los obtenidos por Gómez *et al.* (2006) para todo el noroeste de la provincia. En términos de ondulaciones geoidales, esto representa un error importante teniendo en cuenta que se trata de una región llana. Esta diferencia puede deberse al truncamiento en la serie de coeficientes del modelo geopotencial global (error de omisión) o a deficiencias en la determinación de los coeficientes armónicos que constituyen el modelo (error de comisión) (Jekely, 2012).

2.3.2.2 Ajuste por puntos de nivelación

La diferencia entre modelo y observación no es una constante para toda la región por lo que se generó la grilla de correcciones mostrada en la Figura 2.3. En ella se dibujan las isolíneas cada 10 cm junto con los sitios que dieron lugar a la doble información (GPS y nivelación). Se presentan, además, los valores de corrección de elevación expresadas por la distribución de las diferencias Negm96 - Nobs con los puntos de nivelación IGN. Estas diferencias dieron lugar al SRTMc, de acuerdo con la metodología descripta anteriormente.



Una nueva estadística de las diferencias entre la altura del SRTMc y las originales, permitió apreciar la importancia de la corrección. Esta nueva comparación arroja un desvío estándar de 1,39 m y un valor medio de 0,07 m sobre los mismos puntos que se consideraron originalmente.

Por otra parte, estas comparaciones han sido realizadas sobre puntos de nivelación, los cuales se encuentran cerca de caminos por lo que su altura no siempre representa por completo al terreno circundante. Otros estudios realizados (Perdomo, 2016 com. pers.) sobre puntos ubicados en zonas más representativas del terreno, indican que el desvío estándar puede mejorar aún más e incluso estar por debajo del metro.

2.3.2.3 Comprobación del sistema de drenaje con SRTMc

A partir del SRTMc y con el procesamiento geoespacial con Arc Hydro se identificó el patrón de drenaje superficial y sus derivados en el área en estudio, los cuales permitieron rectificar la cuenca hidrográfica A1 y la generación de redes de flujo. En la Figura 2.4 se visualiza el nuevo límite de cuenca A1 definido para esta tesis con base en las correcciones mencionadas. Es importante indicar que el sistema de drenaje presentado en la misma fue corregido por una digitalización sobre imágenes satelitales Sentinel 2 del año 2018, seleccionadas por su carencia de nubosidad y nitidez. Se visualiza además que la mayor elevación corresponde a 170 msnm y la menor a 50 msnm.

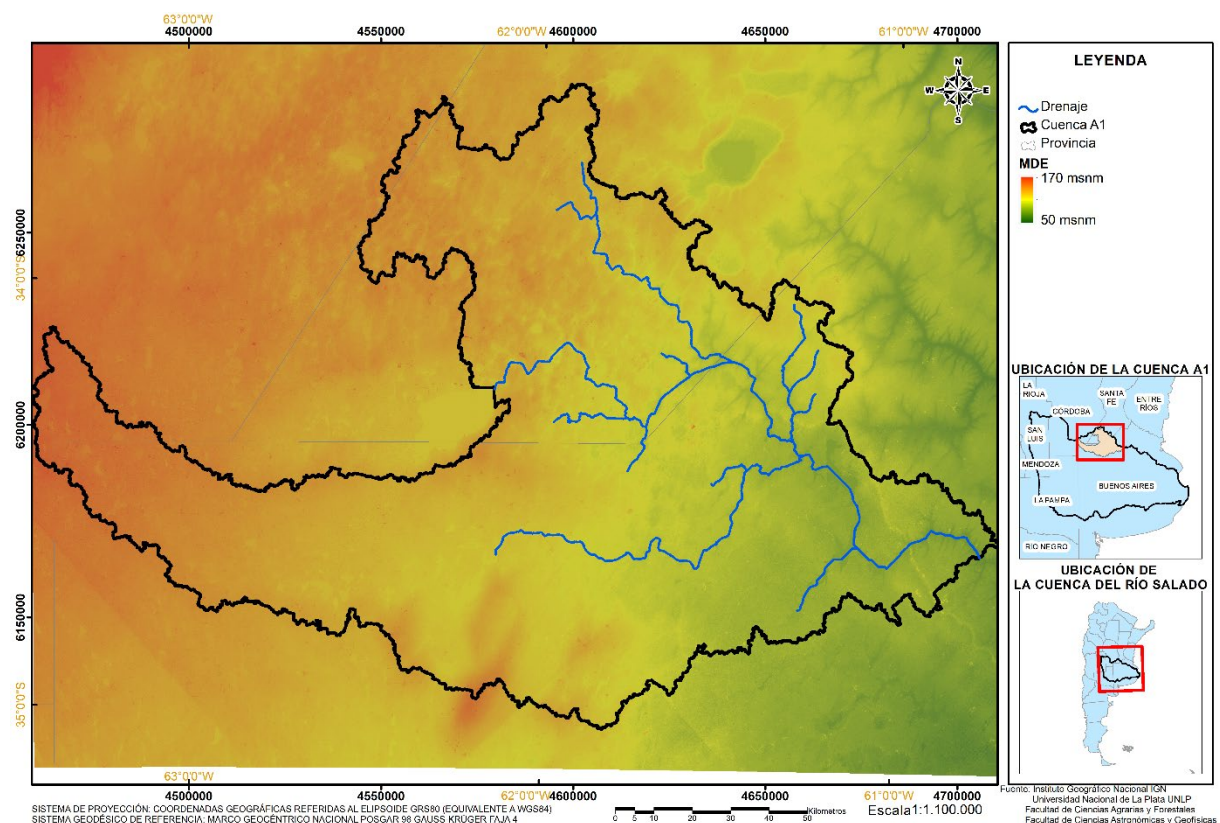


Figura 2.4 Modelo digital de elevación con la delimitación corregida de la cuenca A1 y su sistema de drenaje.

2.3.2.4 Integración de información de inundaciones

El análisis de cuerpos de agua realizado con las imágenes del DFO se presenta en la Figura 2.5 para la cuenca A1 corregida, donde se observan tres límites: uno el generado por IGN como capa vectorial de lagunas permanentes (polígonos color cyan) y otras dos capas obtenidas del procesamiento de las imágenes de DFO en distintas fechas. Estas últimas representan sequía e inundación, considerando el análisis climático en el cual se definieron como objetivos dos límites extremos: época seca con estrés hídrico (en el mes de enero de 2012, línea color rojo) y época con excesos hídricos (agosto de 2015, línea color azul).

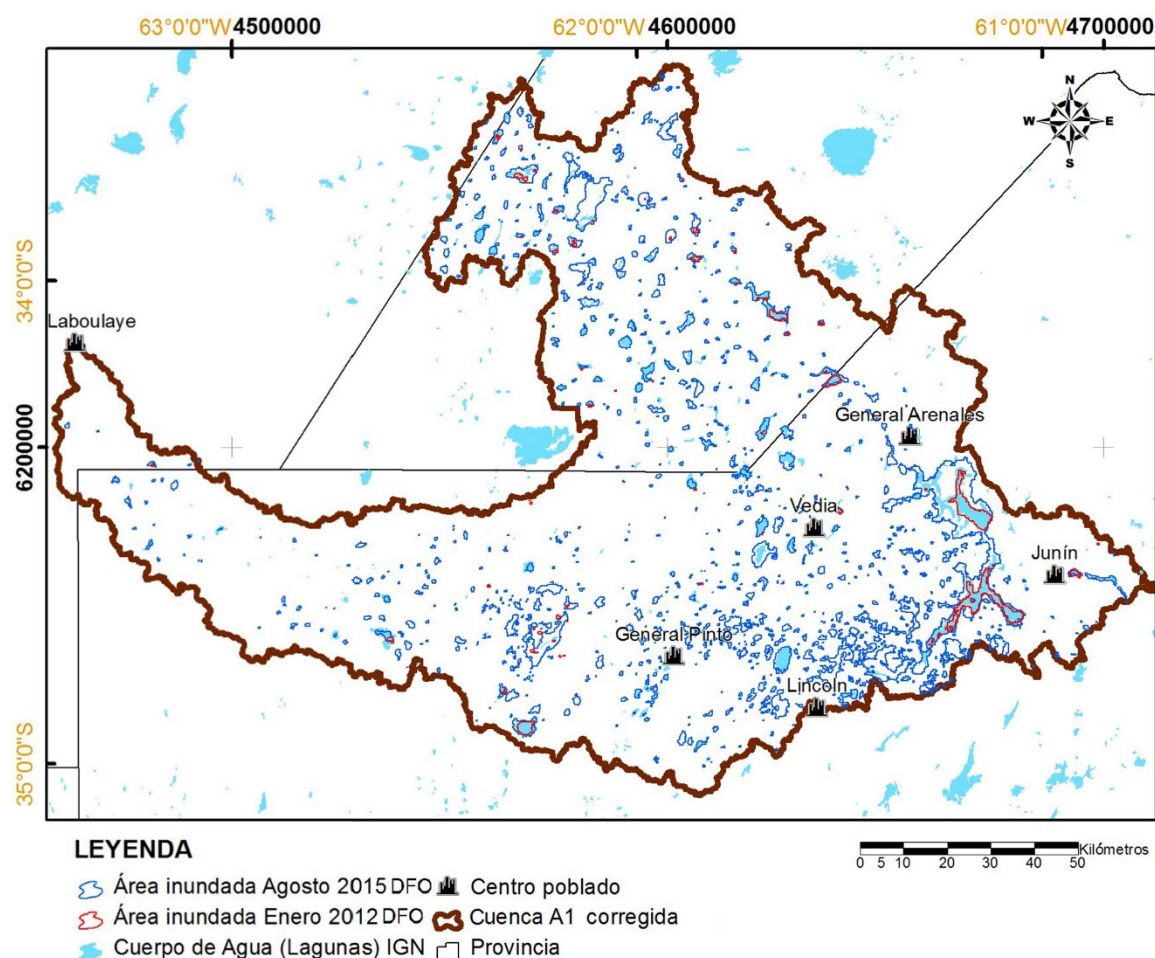


Figura 2.5 Distribución temporal de lagunas en la cuenca A1 corregida. Fuente: Adaptado de Gómez *et al.* (2017).

Las situaciones hidrológicas de la Figura 2.5, que caracterizaron la cuenca A1 corregida según los estadios hidrológicos considerados, donde se expone la superficie de ocupación definida según el procesamiento de imágenes de DFO. La ocupación en superficie de las áreas analizadas fue caracterizada en 3 categorías, siendo la mínima en enero de 2012 con el 0,72% de ocupación de la A1, la media en diciembre de 2012 con 6,7% y en agosto de 2015 alcanzó el 7,36% del área en estudio.

En la Figura 2.6 se presenta el detalle de un área en la cuenca A1 corregida, al oeste de la localidad de General Pinto, donde se realizó una observación particular identificando la superficie de ocupación de

la laguna La Salada, según IGN y comparándola en dos momentos extremos de inundación (A) y sequía (B).

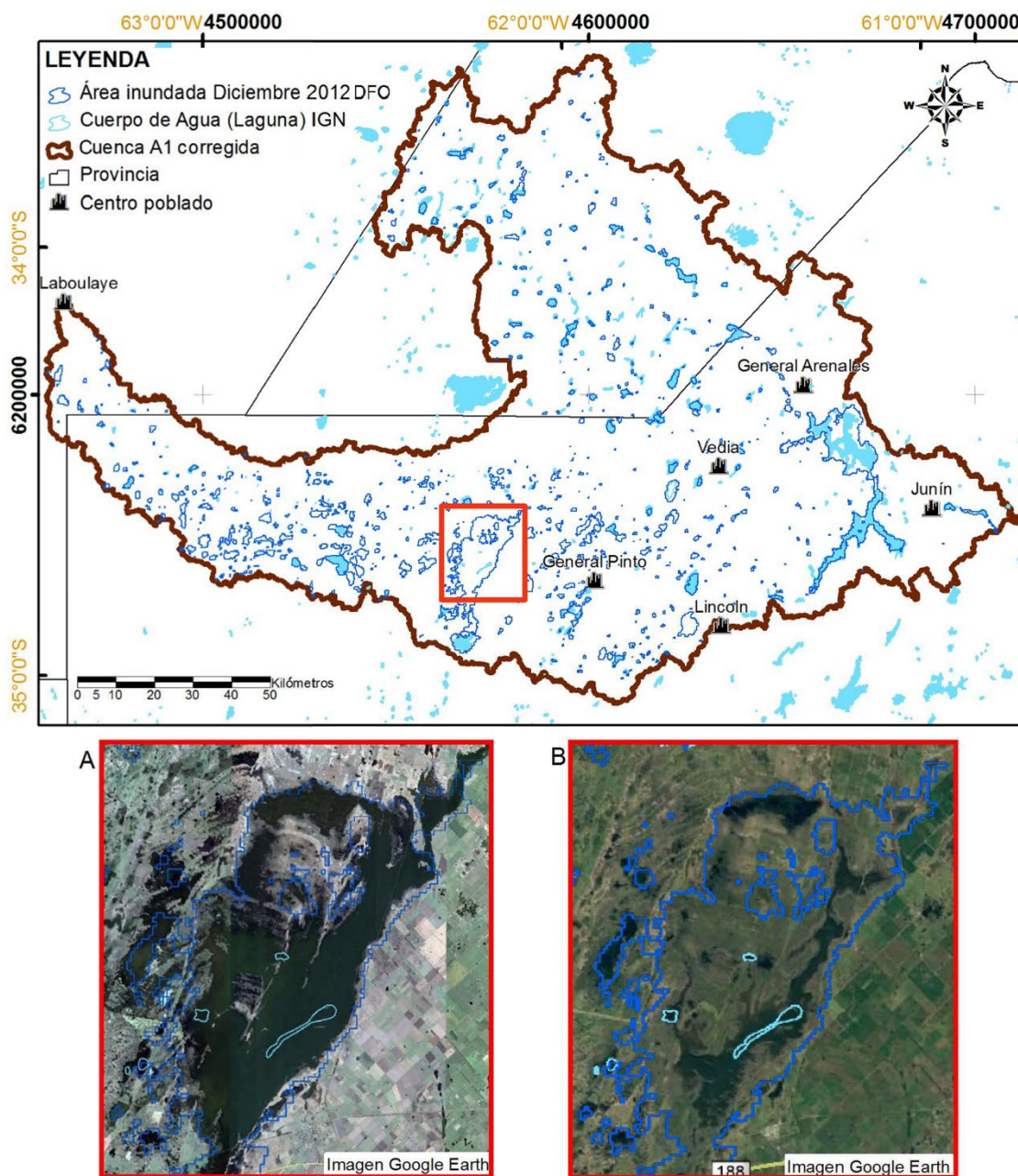


Figura 2.6 Distribución y ocupación espacio-temporal de la laguna La Salada según DFO y dos situaciones extremas: A inundación, B sequía. Fuente: Adaptado de Gómez *et al.* (2017).

En la Figura 2.6 se identificó que, según la cartografía elaborada (DFO) y antecedente (de IGN, s.f.), existe un amplio rango de tamaños lacunares dependiendo del momento de muestreo. Considerando de fondo a las imágenes satelitales por fecha de muestreo, obtenidas de Google Earth ©, la laguna La Salada expresa una leve coincidencia en los límites de inundación con los datos del mes de diciembre de 2012 (línea azul) del DFO.

En la cuenca A1 la superficie ocupada por cuerpos de agua (bañados) alcanza 1.283,05 km² (7,23%), siendo permanentes 19,35 km² (0,11%) y temporales o no permanentes 1.263,70 km² (7,12%)

expresando la mayoría de la ocupación. Según la DFO estos bañados han modificado temporalmente sus dimensiones en función de la dinámica hídrica.

2.4 Conclusiones

La definición de un sistema de drenaje superficial en una cuenca de llanura a partir del SRTM90 ajustado geodésicamente es una metodología que se adecúa a la dinámica hídrica local, en base a esa resolución espacial. Estas correcciones altimétricas no son constantes en la región en estudio, y los resultados alcanzados permitieron mejorar la estadística de las diferencias entre las alturas observadas y las del SRTM90 y así regenerar la morfometría de la cuenca A1 y del sistema de drenaje superficial.

Se observó que a medida que se detallan las características topográficas de una zona, con correcciones geodésicas con datos de campo, es posible delimitar con mayor precisión a una cuenca hidrográfica junto con su sistema de drenaje superficial. Es importante recalcar que, en estudios hidrológicos es de vital importancia que toda la información digital tenga la misma resolución espacial. A mayor precisión o escala que se tenga en la información base, mayor será la exactitud de la información generada a partir de los mismos.

El análisis multitemporal de cuerpos de agua, provenientes de distintas fuentes de información oficial, con los productos del DFO, permitió identificar la dinámica de ocupación hídrica superficial de la zona y evaluar su comportamiento en periodos de estiaje o inundación. El mismo aporta información útil a la toma de decisiones para prevenir o mitigar alertas provenientes de los cuerpos de aguas en una zona de llanura, con características homólogas o similares en su extensión, en especial en lugares con proximidad a zonas pobladas o agropecuarias.

Se reconoce que la utilización de herramientas SIG facilita la manipulación de la información, permitiendo almacenar grandes volúmenes de datos para así compararlos y generar información con mayor precisión. Esta base de datos contribuye a la precisión para el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica, ajustándose a la realidad de la zona de estudio.

La teledetección en este caso ha propiciado al trabajo de equipos multidisciplinarios que resultan indispensables en la ejecución de proyectos hidroambientales.

2.5 Bibliografía

Arozarena, A., Calero, E., Delgado, J., & Vivas, P. (1989). Aplicaciones de las imágenes espaciales a la cartografía de base. En R. Núñez de las Cuevas & F. Fourneau (Eds.), *Coloquio Hispano-Francés sobre Teledetección y Planificación Integrada del Territorio* (pp. 215–223). MOPU / Instituto Geográfico Nacional.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia.

Consultative Group for International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information [CGIAR-CSI]. (2004). *SRTM 90m digital elevation data*. <http://srtm.csi.cgiar.org/>

Dartmouth Flood Observatory [DFO]. (1993). *Active archive of large floods*. University of Colorado. <https://floodobservatory.colorado.edu>

Díaz, G., Mohr-bell, D., & Lencinas, J. D. (2010). Modelos digitales de elevación de alta resolución: Extracción con datos del satélite ALOS. *Notas Patagonia Forestal*, 5-8.

Environmental Systems Research Institute [ESRI]. (2011). *Arc Hydro geoprocessing tools: Tutorial* (Versión 2.0) [Manual].

<https://downloads.esri.com/archydro/archydro/Tutorial/Doc/Arc%20Hydro%20GP%20Tools%202.0%20-%20Tutorial.pdf>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. E. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), Artículo RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Galván, L. (2014). *Análisis y ajuste de modelos digitales de elevaciones en la región central de la Argentina: Integración de modelos geopotenciales e información altimétrica local* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/43457>

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354>

Gómez, M. E., Perdomo, R. A., & Del Cogliano, D. (2006). Modelo de geoide en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. *GEOACTA*, 31, 101–108. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/133820>

Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical geodesy*. W. H. Freeman and Company.

Henao Sarmiento, J. E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás.

Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina [IDERA]. (2007). *Servicios de geoservicios*. <https://www.idera.gob.ar/index.php/servicios/geoservicios>

Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (2009). *Disposición N° 20/2009: Adopción de Posiciones Geodésicas Argentinas del año 2007 (POSGAR 07) como el Marco de Referencia Geodésico Nacional*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07>

Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (s.f.). *Capas SIG: Base de Datos Geoespacial Institucional* [Conjunto de datos geoespaciales] (recuperado el 15 de noviembre de 2017). <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

Jekeli, C. (2012). Omission error, data requirements, and the fractal dimension of the geoid. En N. Sneeuw, P. Novák, M. Crespi, & F. Sansò (Eds.), *VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy* (pp. 181-187). International Association of Geodesy Symposia, Vol. 137. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22078-4_27

Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M. H., Wang, Y. M., Williamson, R. G., Pavlis, E. C., Rapp, R. H., & Olson, T. R. (1998). *The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96* (Informe Técnico NASA/TP-1998-206861). NASA Goddard Space Flight Center.

Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica.
https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1

Perdomo, R., Del Cogliano, D. H., Mendoza, L. P. O., Gómez, M. E., & Bagu, D. R. (2012). *Servicio de transformación de alturas en Buenos Aires: tdaGEOBA* [Software/modelo geodésico]. Universidad Nacional de La Plata. Accedido el 1/7/2016. <http://geoweb.fcaglp.unlp.edu.ar/tdaGEOBA/>

Rodriguez, E., Morris, C. S., Belz, J. E., Chapin, E. C., Martin, J. M., Daffer, W., & Hensley, S. (2005). *An assessment of the SRTM topographic products* (Informe Técnico JPL D-31639). Jet Propulsion Laboratory.

Rodríguez, E., Morris, C. S., & Belz, J. E. (2006). A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249–260.
<https://doi.org/10.14358/PERS.72.3.249>

3 MORFOMETRÍA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

3.1 Introducción

Las estrategias tradicionales de ordenamiento territorial (OT) suelen estar construidas de manera verticalista, con escasa y muchas veces sesgada información técnico-científica. Este tipo de estrategias suelen tener una mirada fragmentada del territorio, habitualmente focalizada en el desarrollo urbano-industrial, basada en los intereses y necesidades de unos pocos actores, desconociendo la historia local y los beneficios y necesidades de la población (Baldini *et al.*, 2019; Guzmán *et al.*, 2021).

La transformación territorial está vinculada a la expansión de la agricultura sobre ecosistemas naturales, principalmente boscosos. Al pasar de coberturas naturales a usos agrarios se disminuye la cobertura del suelo, incrementando la pérdida del suelo por erosión hídrica superficial (Díaz Gómez & Gaspari, 2018). En este contexto de vulnerabilidad ambiental, la información de precipitación también es crítica para la comprensión del equilibrio hidrológico a diferentes escalas, y para la comprensión de las interacciones complejas que existen entre los componentes del ciclo hidrológico (Gavilán *et al.*, 2019).

Como expresa Guzmán *et al.* (2021) estos procesos degradativos originarán impactos de diferente magnitud intra e interzonal dando significación espacio-temporal expresando la fragilidad de cada área funcional en una cuenca hidrográfica, su transformación territorial y la dificultad de un manejo integral del agua y sus recursos naturales.

En ordenamiento de cuencas hidrográficas, se plantean estrategias para el análisis de variables morfométricas, que expresan el nivel de fragilidad de estas unidades de gestión territorial, debido a que el conocimiento de la variación espacial de los parámetros de forma, relieve y drenaje permiten manifestar y diseñar las líneas generales del movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari *et al.*, 2013; Michalijos & Zapperi, 2015; Venkatesh & Anshumali, 2019; Khurana *et al.*, 2020).

Los indicadores morfométricos se determinan con el uso de técnicas de detección remota en sistema de información geográfica (SIG), mediante el análisis de modelos de elevación digital (MED – DEM por sus siglas en inglés), como ser SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission) generado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2000), y puntos de posicionamiento geoespacial (GPS) obtenidos en campo (Guzmán *et al.*, 2021), como se menciona en el capítulo 5 de la presente tesis.

El análisis de los parámetros morfológicos permite identificar subcuencas críticas donde se requiere implementar medidas prioritarias de conservación y manejo integral de recursos hídricos (Singh *et al.*, 2021). La jerarquización de subcuencas según su fragilidad morfométrica constituye un elemento fundamental para el desarrollo de programas de gestión eficientes y sostenibles, optimizando la asignación de recursos naturales y la implementación de intervenciones de mitigación (Chowdary *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2021). Tradicionalmente, la determinación de parámetros morfológicos mediante métodos convencionales demandaba considerable tiempo, recursos económicos y esfuerzo de campo, no obstante, la incorporación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y tecnologías de teledetección ha potencializado este proceso, permitiendo análisis más rápidos, precisos y económicamente viables para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (Agarwal, 1998; Singh *et al.*, 2021).

Por su parte, la morfometría establece factores que pone en manifiesto las áreas que presentan fragilidad natural, que, a partir de una combinación de condiciones intrínsecas en cada cuenca hidrográfica, expresa sus problemáticas y potencialidades de carácter biofísico, como así también sus relaciones entre los múltiples usos e intereses socio productivos, base para el OT.

La fragilidad ambiental se refiere al nivel de susceptibilidad de un sitio debido al efecto de algunos factores dañinos o situaciones de alto riesgo (Guzmán *et al.*, 2021). La presencia de un sistema de llanura influye en la variabilidad climática y en la dinámica hídrica en cuencas hidrográficas debido a los cambios en la morfometría de cada unidad hidrológica infiriendo fragilidad, experimentando cambios en la distribución de la cobertura vegetal. La ausencia de una planificación de uso de la cobertura vegetal del territorio intensifica los procesos de degradación ambiental en estos sitios, representados por la escasez de prácticas agrícolas con medidas conservacionistas, la recurrencia de periodos de sequía e inundación.

El objetivo del presente capítulo fue analizar la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica de la cuenca A1, Argentina. El análisis integrado de parámetros morfométricos permite establecer el grado de fragilidad y la susceptibilidad de las cuencas hidrográficas ante procesos de degradación. Parámetros como la densidad de drenaje, la relación de bifurcación, la constante de mantenimiento del canal y el coeficiente de rugosidad proporcionan información valiosa sobre la dinámica hidrológica superficial, la capacidad de infiltración del terreno y el potencial erosivo de la cuenca (Singh *et al.*, 2021). La jerarquización de subcuencas mediante estos indicadores morfométricos facilita la identificación de unidades hidrológicas prioritarias que requieren mayor atención en términos de conservación de suelos y gestión del recurso hídrico, constituyendo una herramienta fundamental para la toma de decisiones en programas de desarrollo y manejo sustentable de cuencas (Javed *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2021).

3.2 Metodología

La morfometría constituye el análisis cuantitativo de la configuración superficial del terreno y sus características topográficas (Clarke, 1966; Pakhmode *et al.*, 2003). Diversos fenómenos hidrológicos pueden correlacionarse directamente con las características fisiográficas de las cuencas hidrográficas (Rastogi & Sharma, 1976). El análisis morfométrico permite una interpretación integral de la respuesta hidrológica de una cuenca, incluyendo la generación de escorrentía superficial, la capacidad de infiltración y el potencial de recursos hídricos subterráneos (Singh *et al.*, 2021). Adicionalmente, parámetros como el tiempo de concentración, el tiempo al pico del hidrograma y la intensidad de los procesos erosivos pueden estimarse con mayor precisión mediante este tipo de análisis (Altaf *et al.*, 2013). La metodología morfométrica resulta particularmente valiosa en cuencas en donde la información hidrológica, geológica, geomorfológica y edafológica es limitada (Romshoo *et al.*, 2012; Puno & Puno, 2019). Asimismo, este enfoque constituye una herramienta valiosa para la evaluación y jerarquización de cuencas, el análisis de frecuencia de inundaciones, la gestión y conservación de recursos naturales, y el control de procesos erosivos (Singh *et al.*, 2021).

En el presente estudio, se adoptó un enfoque combinado que utiliza la cartografía mencionada en el capítulo 5, para definir el estado de erosión y sedimentación. Se priorizaron cinco subcuencas mediante el uso de parámetros morfométricos y se clasificaron según su vulnerabilidad a la erosión del suelo y excesos hídricos. La caracterización morfométrica de la A1 se realizó integrando

metodologías aportadas por varios autores, entre ellos Horton (1945), López Cadenas del Llano (1998), Gaspari *et al.* (2013, 2025), Khurana *et al.* (2020), Guzmán *et al.* (2021) y Singh *et al.* (2021).

El modelo digital de elevación (MDE) utilizado en el capítulo 2 (Figura 2.4) como resultado antecedente de la tesis, el cual se empleó para la delimitación de subcuencas y la traza de perfiles longitudinales representativos del relieve, que esquematizaron la rugosidad. Mediante la utilización de técnicas de detección remota y sistema de información geográfica (SIG), del software QGIS®, se generó la grilla de dirección de flujo, acumulación de flujo y red hidrográfica, y se determinaron los órdenes de los cauces que conforman la red de drenaje, aplicando una rutina de cálculo en el área de estudio, los cuales fueron corroborados a campo. Se ajustaron estos cursos fluviales por medio de la digitalización de manera manual y a partir del reconocimiento y análisis del historial de imágenes satelitales de Sentinel 2.

La cuantificación morfométrica se estableció con datos base del MDE, aplicando ecuaciones para la obtención de los parámetros de forma, relieve y drenaje.

3.2.1 Parámetros de forma

Se calcularon la superficie de ocupación de la cuenca y de cada subcuenca de la A1 (área)(A); el perímetro (P) definido como la longitud de la línea envolvente de cada subcuenca sobre la divisoria de aguas; la Longitud axial (La) determinada como la distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca; el Ancho máximo (a) y el promedio (AP) expresado por el cociente entre el área de la cuenca y su longitud axial; el Factor de forma de la cuenca (Ff) que comprende la distribución o arreglo geométrico de los ríos tributarios que integran la red hidrográfica (Guzmán *et al.*, 2021; Gaspari *et al.*, 2025).

Además, se determinó la Relación de elongación (Re) que expresa la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tiene la misma área que cada subcuenca y la longitud máxima de la misma y se estableció la Relación de circularidad (Rc), que es la relación del área de una subcuenca al área de un círculo que tiene la misma circunferencia que su perímetro (Guzmán *et al.*, 2021). La Re proporciona una medida normalizada de la forma de la cuenca (Schumm, 1956).

Finalmente, se cuantificó el Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc) que refleja la importancia de la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente sobre los escurrimientos y la marcha del hidrograma resultante de una precipitación. El Kc relaciona el perímetro de la cuenca con el de un círculo de área equivalente, constituyendo un indicador fundamental de la forma de la cuenca y su influencia sobre la esorrentía (Gravelius, 1914). Este parámetro adimensional varía desde 1 (para una cuenca circular) hasta valores superiores conforme la forma se alarga o vuelve irregular. (Gaspari *et al.*, 2013, 2025; Guzmán *et al.*, 2021). Para el Ff con Re y el Kc se clasificó en rangos particulares para cada unidad hidrológica.

En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros morfométricos de forma aplicados a esta tesis, como a su simbología, unidad de medida, ecuación y referencia.

Tabla 3.1. Parámetros morfométricos de forma a nivel de cuenca hidrográfica. Fuente: Guzmán *et al.* (2021).

Parámetro	Símbolo	Unidad	Ecuación	Referencia
Área	A	km ²		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Perímetro	P	km		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Longitud axial	La	km		Horton (1945)
Factor de forma	Ff		A/La^2	Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Ancho Promedio	AP	km	A/La	Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Diámetro	D	km	$(A/\pi)^{1/2} * 2$	Strahler (1964)
Relación de elongación	R _e		D/La	Schumm (1956)
Relación de circularidad	R _c		$4 \pi A / P^2$	Strahler (1964)
Índice de compacidad de Gravelius	K _c		$0,284 * P/A^{0,5}$	Gravelius (1914)

3.2.2 Parámetros de relieve

Se estableció la cota por medio de la Elevación máxima (H_{max}) y mínima de cada subcuenca (H_{min}); el Desnivel (H) definido como la diferencia entre la elevación máxima y la mínima; la Pendiente media de la cuenca (PM), obtenida a partir del MDE corregido por medio del programa QGis©. Además, se calculó el Relieve relativo (Rr) que es el cociente entre el máximo desnivel de cada subcuenca y su perímetro; la Relación relieve (Rh) que se determinó como el cociente entre el máximo desnivel de cada subcuenca y su longitud axial.

Por último, el Coeficiente de rugosidad (Ra) (Abdeta *et al.*, 2020) cual se clasifico según Farhan *et al.* (2015), definido como el cociente entre (H) y (Dd). Es un indicador de la intensidad de los procesos geomórficos, presentando valores bajos en pendientes son planas.

En la Tabla 3.2 se presentan los parámetros morfométricos de relieve aplicados a esta tesis, como a su simbología, unidad de medida, ecuación y referencia.

Tabla 3.2. Parámetros de relieve a nivel de cuenca. Fuente: Guzmán *et al.* (2021).

Parámetro	Símbolo	Unidad	Ecuación	Referencia
Elevación máxima	H _{max}	msnm		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Elevación mínima	H _{min}	msnm		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Desnivel	H	km	$(H_{max} - H_{min}) / 1000$	Hadley y Schumm (1961)
Pendiente media	PM	%		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Relieve relativo	Rr		$H * 100 / P$	Schumm (1963)
Relación relieve	Rh		H / La	Schumm (1956)
Coeficiente de rugosidad	Ra		$H * Dd$	López Cadenas de Llano (1998)

Para la caracterización integral del relieve a nivel de subcuenca, se elaboraron perfiles longitudinales topográficos utilizando el MDE SRTM corregido de la cuenca A1. Los perfiles se trazaron siguiendo la longitud axial de cada subcuenca, desde el punto más elevado hasta la desembocadura, permitiendo visualizar la variación altimétrica y las características del relieve (Strahler, 1952; Hack, 1973).

La extracción de perfiles longitudinales se realizó en QGis© mediante la herramienta "Profile Tool". El procedimiento consistió en la digitalización de líneas vectoriales siguiendo la longitud axial de cada subcuenca desde la divisoria de aguas hasta la desembocadura, la extracción automática de valores altimétricos del MDE a lo largo de cada línea en intervalos de muestreo regulares, y representación gráfica de los perfiles con la distancia acumulada en el eje horizontal (m) y la elevación en el eje vertical (msnm). Esta metodología permite identificar características del relieve como cambios de pendiente, presencia de terrazas, zonas de acumulación o erosión, y el grado de equilibrio geomorfológico de cada subcuenca (Hack, 1973; Demoulin, 1998; Schwanghart & Scherler, 2014).

3.2.3 Parámetros de la red de drenaje

Corresponden a la distribución o arreglo geométrico de los ríos tributarios que conforman cada unidad hidrológica (Gaspari *et al.*, 2013), representados por la Longitud total de la red de drenaje (L_u) determinada por la sumatoria de la longitud de todos los cursos de agua que conforman la red de drenaje; la Densidad de drenaje (D_d) definida como el cociente entre (L_u) y el área de la cuenca (A); la Longitud del cauce principal (L).

La longitud del cauce principal (L) se define como la distancia medida a lo largo del curso de agua de mayor orden, desde su nacimiento hasta la desembocadura (Gaspari *et al.*, 2013). La longitud axial (L_a), por su parte, representa la distancia en línea recta entre la desembocadura y el punto topográficamente más alejado de la cuenca (Schumm, 1956). Estos parámetros son fundamentales para determinar el tiempo de concentración y caracterizar la respuesta hidrológica del sistema (Kirpich, 1940; Gaspari, 2007).

La longitud del flujo terrestre o superficial (L_o) representa la distancia horizontal promedio que el agua de escorrentía recorre sobre el terreno antes de concentrarse en un canal definido (Horton, 1945). Este parámetro se calcula como la inversa del doble de la densidad de drenaje, constituyendo un indicador del tiempo de residencia del agua sobre las laderas y las oportunidades de infiltración antes de la concentración en cauces (Langbein *et al.*, 1947; Strahler, 1957). Valores elevados de L_o indican mayores distancias de recorrido superficial y menor densidad de canales, mientras que valores bajos sugieren rápida concentración de escorrentía (Strahler, 1964).

También se determinó la Elevación máxima y mínima del cauce (cota) (msnm), con el MDE corregido, para establecer la pendiente media del cauce principal en cada subcuenca (PMC), y la constante de mantenimiento del canal (C) que es la inversa de la densidad de drenaje.

El máximo orden de cauce se estableció por el método Strahler (1964), para lo cual se cuantificó la cantidad de cauces (N_u) y el número de cauces del primer orden (N_{u1}), coeficiente de torrencialidad (C_t) que se expresa como el cociente entre N_{u1} y A , y la frecuencia de cauces (F_s) por subcuenca siendo este un cociente entre la cantidad por unidad de superficie. La textura de drenaje (T) representa la relación entre la D_d y la F_s .

En la Tabla 3.3 se presentan los parámetros morfométricos de drenaje aplicados a esta tesis, como a su simbología, unidad de medida, ecuación y referencia.

Tabla 3.3. Parámetros de drenaje a nivel de cuenca. Fuente: Guzmán *et al.* (2021).

Parámetro	Símbolo	Unidad	Ecuación	Referencia
Longitud de la red de drenaje	Lu	km		Horton (1945)
Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	Lu/A	Horton (1945)
Longitud del flujo terrestre	Lo	km	$Lo = 1 / (2 * Dd)$	Horton (1945)
Constante de mantenimiento del canal	C	1/km * km ⁻²	1 /Dd	Schumm (1963)
Longitud del cauce principal	L	km		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Elevación máxima del cauce	Hmax	msnm		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Elevación mínima del cauce	Hmin	msnm		Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Pendiente media del cauce principal	PMC	%	$((HC_{max} - HC_{min}) / L) * 100\%$	Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Número de cauces	Nu			Horton (1945)
Número de cauces de primer orden	Nu1			Strahler (1964)
Coeficiente de torrencialidad - Ct	Ct		Nu1/A	Gaspari <i>et al.</i> (2013)
Textura de drenaje	T	km * #cauce / km ²	Dd * Fs	Smith (1950)
Frecuencia de cauce	Fs	# cauces / km ²	Nu/A	Horton (1945)

3.2.4 Priorización de la fragilidad morfométrica de la cuenca A1

Adicionalmente, se priorizaron las subcuencas hidrográficas en relación con los riesgos de erosión e inundaciones. Se seleccionaron parámetros morfométricos lineales, como la longitud media del flujo superficial (Lo); parámetros morfométricos areales, como la densidad de drenaje (Dd), la textura del drenaje (T), la frecuencia del cauce (Fs), constante de mantenimiento del canal (C), coeficiente de torrencialidad (Ct), el factor de forma (Ff), la relación de elongación (Re), la relación de circularidad (Rc) y el coeficiente de compacidad (Kc); y parámetros morfométricos de relieve, como la pendiente media (PM), relieve relativo (Rr), relación de relieve (Rh) y el coeficiente de rugosidad (Ra), para su consideración en la priorización de las subcuencas. Se asignaron ponderaciones a cada parámetro en función de su importancia con respecto al riesgo de erosión del suelo y excesos hídricos aplicando la metodología de Guzmán *et al.* (2021) y de Singh *et al.* (2021). Una mayor ponderación significa una mayor importancia de los parámetros en relación con la incidencia de la erosión del suelo y excesos hídricos. Estas ponderaciones se distribuyen equitativamente entre los parámetros morfométricos: cuatro areales, cuatro de relieve y seis de drenaje.

Se otorgaron mayores prioridades (numéricamente pequeñas) a las subcuencas con mayor erosionabilidad y fragilidad ante las inundaciones. A las 5 subcuencas de la A1 se les asigna un rango de prioridad de 1 a 5, dependiendo de la magnitud de cada parámetro morfométrico. Cada rango de prioridad se multiplica por sus respectivas ponderaciones, y la suma de todos los parámetros morfométricos de cada subcuenca constituye el rango compuesto de dicha unidad hidrológica. Los parámetros morfométricos considerados para la priorización como la textura y la densidad del drenaje, la frecuencia de los cursos de agua, la longitud del flujo superficial, el coeficiente de relieve y el índice de rugosidad tienen una relación directa con la erosionabilidad del suelo, mientras que otros parámetros como el factor de forma, el coeficiente de compacidad, el índice de circulación y el índice de elongación tienen una relación inversa con la erosionabilidad del suelo.

Con base en la magnitud de los rangos compuestos obtenidos, se estableció una clasificación jerárquica de las subcuencas asignando valores de prioridad. La escala de priorización se estructuró de manera que los valores numéricos menores del rango compuesto reciben la máxima prioridad (prioridad 1), identificando las subcuencas de mayor fragilidad morfométrica que demandan intervenciones urgentes de conservación de suelos y gestión del recurso hídrico. Por el contrario, los valores numéricos superiores se asignaron a la mínima prioridad (prioridad 5), correspondiendo a subcuencas con menor vulnerabilidad ante procesos de erosión e inundaciones (Guzmán *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021).

La asignación de rangos se fundamentó en el tipo de relación (directa o inversa) que cada parámetro morfométrico presenta con la susceptibilidad de la cuenca a generar inundaciones o erosión del suelo (Abdeta *et al.*, 2020; Arulbalaji & Padmalal, 2020; Jothimani *et al.*, 2020). Para parámetros con relación directa (donde valores mayores indican mayor fragilidad), se asignó el rango 1 al valor máximo y el rango 5 al valor mínimo, considerando que la cuenca en estudio se subdivide en 5 subcuencas. En contraste, para parámetros con relación inversa (donde valores menores indican mayor fragilidad), el proceso de asignación se invirtió, otorgando el rango 1 al valor mínimo y el rango 5 al valor máximo, como es el caso del Kc y C.

Posteriormente, para cada subcuenca se calculó el parámetro compuesto morfométrico (PCM), definido como el promedio ponderado de todos los rangos asignados a los parámetros morfométricos considerados. Con base en los valores de PCM obtenidos para las cinco subcuencas, se establecieron tres categorías de priorización según su grado de fragilidad morfométrica: alta, media y baja (López Pérez *et al.*, 2015). Los intervalos para cada categoría se determinaron mediante el método de amplitud de clase uniforme, aplicando las siguientes expresiones:

$$\text{Prioridad Alta} = \quad \quad \quad PCM_{min} \leq PCM < PCM_{min} + \frac{(PCM_{max} - PCM_{min})}{3}$$

$$\text{Prioridad Media} = \quad PCM_{min} + \frac{(PCM_{max} - PCM_{min})}{3} \leq PCM < PCM_{min} + 2 \times \frac{(PCM_{max} - PCM_{min})}{3}$$

$$\text{Prioridad Baja} = \quad \quad \quad PCM \geq PCM_{min} + 2 \times \frac{(PCM_{max} - PCM_{min})}{3}$$

Donde:

PCM : Parámetro Compuesto Morfométrico de cada subcuenca

PCM_{min} : Valor mínimo del PCM entre todas las subcuencas

PCM_{max} : Valor máximo del PCM entre todas las subcuencas

Este método de clasificación por intervalos uniformes permite una distribución equitativa de las categorías de priorización, facilitando la identificación objetiva de las subcuencas que requieren atención prioritaria en programas de conservación y manejo integral de recursos hídricos (Abdeta *et al.*, 2020; Arulbalaji & Padmalal, 2020). La aplicación de este enfoque multicriterio proporciona una base técnica sólida para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial en la cuenca de estudio A1.

3.3 Resultados y discusión

La A1 tiene una superficie de ocupación (A) de 17.737,63 km² y de acuerdo con los parámetros de forma Kc, La y Ff, se caracteriza por ser de forma alargada, representada por dos vértices en las cabeceras, generando efluentes de longitud similar, que pueden provocar crecidas significativas. La red de drenaje muestra un patrón natural dendrítico de orden 3, con orientación norte – sur sobre un eje y el otro oeste – este, cuya densidad de drenaje es extremadamente baja con un valor de 0,03 km/km², según la clasificación de Delgadillo y Páez (2008). Presenta un desnivel comprendido entre 143,23 a 62,41 msnm, con una pendiente media de 0,9%. El procesamiento geoespacial de la información altimétrica permitió definir la divisoria de aguas superficial de unidades hidrológicas menores, subcuencas, corroborando además su sistema de drenaje superficial.

3.3.1 Caracterización morfométrica integral de la cuenca A1

El análisis morfométrico integral de la cuenca A1 revela características distintivas de un sistema hidrológico de llanura, con una superficie total de 17.737,63 km² y un patrón de drenaje dendrítico de orden 3. La integración de los parámetros de forma, relieve y drenaje permite establecer una caracterización completa de la dinámica hídrica superficial y la fragilidad morfométrica de esta unidad hidrológica. En la Tabla 3.4 se expone la compilación de los resultados para la cuenca completa A1.

Tabla 3.4. Parámetros morfométricos para la Cuenca A1.

	Parámetro	CUENCA
Forma	Factor de forma Ff	0,17
	Relación de elongación Re	0,46
	Relación de circularidad Rc	0,22
	Índice de compacidad de Gravelius Kc	3,97
Relieve	Pendiente media PM (%)	0,9000
	Relieve relativo Rr	0,004
	Relación relieve Rh	0,0002
	Coefficiente de rugosidad Ra	0,0027
Drenaje	Densidad de drenaje Dd (km/km ²)	0,03
	Longitud del flujo terrestre Lo (km)	15,17
	Constante de mantenimiento del canal C (1/km* km ²)	30,33
	Coefficiente de torrencialidad Ct	0,0033
	Textura de drenaje T (km*Nu / km ²)	0,00004
	Frecuencia de cauce Fs (Nu / km ²)	0,0013

3.3.1.1 Parámetros de forma

La cuenca A1 presenta una morfología extremadamente alargada, evidenciada por un factor de forma (Ff) de 0,17 y una relación de elongación (Re) de 0,46, valores que indican una configuración longitudinal pronunciada que favorece la atenuación de crecidas y la distribución temporal de los aportes hídricos (Horton, 1945; Schumm, 1956). Esta forma elongada implica que los tributarios de diferentes sectores de la cuenca no coinciden temporalmente en sus aportes a la desembocadura,

reduciendo significativamente la magnitud de los caudales pico durante eventos de precipitación y disminuyendo la susceptibilidad a inundaciones súbitas (Gaspari *et al.*, 2013).

La relación de circularidad (R_c) de 0,22 confirma una forma considerablemente alejada de la configuración circular, coherente con el factor de forma y la relación de elongación observados. El índice de compacidad de Gravelius (K_c) de 3,97 clasifica a la cuenca como rectangular-oblonga, ratificando su morfología alargada e irregular (Gravelius, 1914; López Cadenas de Llano, 1998). Este coeficiente de compacidad indica que el perímetro de la cuenca es casi cuatro veces mayor que el de un círculo de área equivalente, que tiene implicaciones hidrológicas favorables en términos de reducción de la torrencialidad y menor riesgo de concentración rápida de escorrentía (Strahler, 1964; Gaspari *et al.*, 2025).

3.3.1.2 Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve de la cuenca A1 evidencian características típicas de ambientes de llanura, con una pendiente media (PM) de 0,90%, clasificada como muy suave y favorable para procesos de infiltración sobre escorrentía superficial (Díaz Gómez & Gaspari, 2018). Esta pendiente extremadamente baja implica velocidades de flujo reducidas que favorecen la sedimentación y disminuyen la capacidad erosiva del agua, aunque incrementan el tiempo de residencia y la susceptibilidad a anegamientos en áreas deprimidas durante eventos de precipitación prolongados (Guzmán *et al.*, 2021).

El relieve relativo (R_r) de 0,004 y la relación de relieve (R_h) de 0,0002 reflejan un desnivel altimétrico mínimo en relación con el perímetro y la longitud axial de la cuenca, respectivamente, confirmando la condición de llanura con escasa diferenciación topográfica (Cruz *et al.*, 2015). Estos valores extremadamente bajos indican una energía de relieve limitada disponible para procesos erosivos intensos, aunque la escasa pendiente puede dificultar el drenaje natural y favorecer la acumulación temporal de agua en sectores topográficamente más bajos (Venkatesh & Anshumali, 2019).

El coeficiente de rugosidad (R_a) de 0,0027 se clasifica como bajo según Farhan *et al.* (2015), indicando un terreno con baja sinuosidad y suavidad en el relieve que facilita el flujo laminar de escorrentía y reduce la formación de canales profundos o cárcavas. Esta baja rugosidad es coherente con el ambiente de llanura y las pendientes suaves que caracterizan la cuenca A1 (Strahler, 1952).

3.3.1.3 Parámetros de drenaje

La densidad de drenaje (D_d) de la cuenca A1 es de 0,03 km/km², clasificándose como extremadamente baja según los criterios de Delgadillo y Páez (2008). Este valor indica una red hidrográfica poco densa, característica de regiones con materiales permeables, cobertura vegetal significativa y relieves suaves donde predominan los procesos de infiltración sobre la escorrentía superficial directa (Horton, 1945; Strahler, 1964). La baja densidad de drenaje implica que se requieren áreas considerables para la formación y mantenimiento de cauces definidos, como lo confirma la constante de mantenimiento del canal (C) de 30,33 km²/km, valor que expresa la superficie necesaria para sostener un kilómetro de canal (Schumm, 1956).

La longitud del flujo terrestre (L_o) de 15,17 km refleja un valor elevado que favorece la infiltración y reduce la velocidad de respuesta hidrológica de la cuenca (Langbein *et al.*, 1947; Strahler, 1957). Este

parámetro, junto con la baja densidad de drenaje, explica el comportamiento hidrológico atenuado de la cuenca ante eventos de precipitación.

El coeficiente de torrencialidad (C_t) de 0,0033 y la frecuencia de cauces (F_s) de 0,0013 son valores bajos que confirman una escasa capacidad de generación de flujos concentrados intensos y una red hidrográfica poco desarrollada en términos de número de cauces por unidad de superficie (Gaspari *et al.*, 2013). La textura de drenaje (T) de 0,00004 km²·#cauce/km² se clasifica como muy gruesa según Smith (1950), ratificando la condición de baja disección del terreno y predominancia de procesos de infiltración.

3.3.1.4 Integración morfométrica por fragilidad de la cuenca

La integración de todos los parámetros morfométricos analizados permite establecer que la cuenca A1 presenta una fragilidad morfométrica moderada-baja a escala global, caracterizada por una morfología alargada que favorece la atenuación de crecidas, un relieve suave con baja energía erosiva disponible y una red de drenaje poco densa que privilegia la infiltración sobre la escorrentía superficial concentrada (Horton, 1945; Strahler, 1964; Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

Sin embargo, las pendientes extremadamente suaves y los prolongados tiempos de concentración también confieren ciertas vulnerabilidades específicas al sistema, particularmente relacionadas con la susceptibilidad a anegamientos temporales, dificultades en el drenaje natural de áreas deprimidas y acumulación progresiva de sedimentos en zonas de baja energía (Venkatesh & Anshumali, 2019). La baja torrencialidad y el escaso desarrollo de la red de drenaje reducen el riesgo de erosión hídrica concentrada, aunque no eliminan completamente la posibilidad de erosión laminar difusa en sectores con cobertura vegetal degradada o uso agrícola intensivo sin prácticas conservacionistas (Díaz Gómez & Gaspari, 2018).

La caracterización morfométrica de la cuenca A1 constituye una base técnica importante para el desarrollo de estrategias de ordenamiento territorial y gestión integrada de recursos hídricos adaptadas a las condiciones específicas de este sistema de llanura. Los resultados obtenidos permiten identificar tanto las fortalezas del sistema (morfología favorable, baja torrencialidad, escasa energía erosiva) como sus vulnerabilidades particulares (susceptibilidad a anegamientos, drenaje lento, tiempos de respuesta prolongados) orientando la implementación de medidas de manejo diferenciadas según las características morfométricas de cada subcuenca y las condiciones generales de la cuenca en su conjunto (Khurana *et al.*, 2020; Guzmán *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021).

3.3.2 Caracterización y análisis morfométrico a nivel de subcuenca

Los parámetros morfométricos calculados según la Tabla 3.1 se establecieron para las 5 subcuencas que conformaron el área de estudio, cuyos valores obtenidos para este estudio se presentan en la Tabla 3.5.

En la Figura 3.1 se muestra el MDE utilizado para la definición de los parámetros morfométricos, donde se marcan las subcuencas identificadas y los cursos de agua permanentes digitalizados en forma manual a partir de imágenes satelitales Sentinel 2.

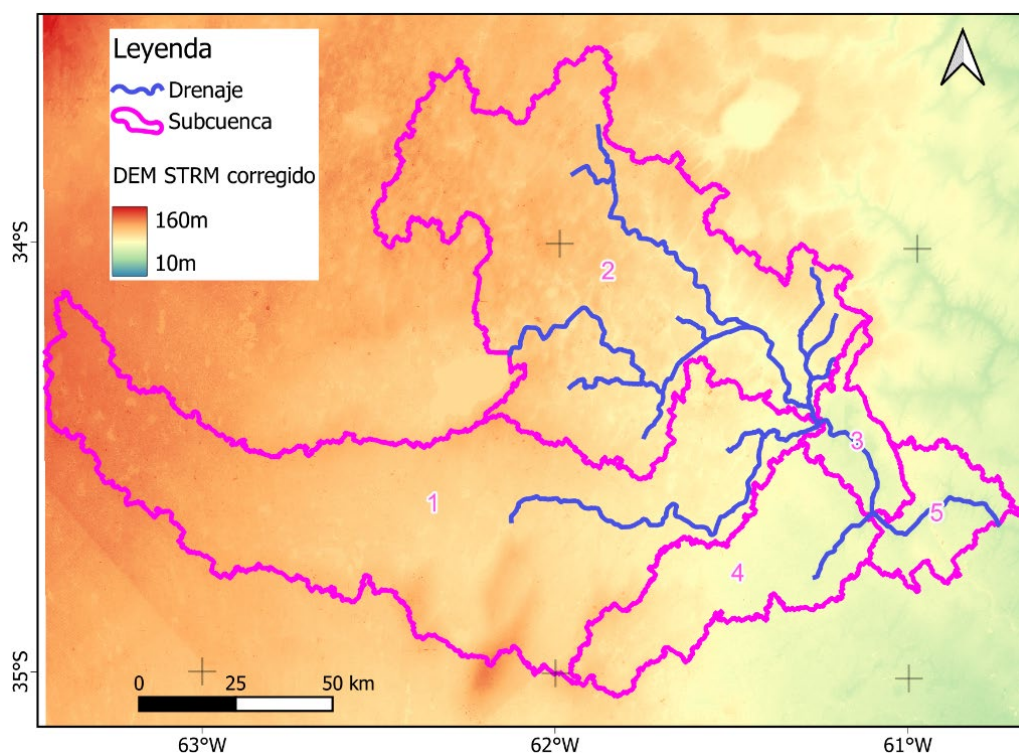


Figura 3.1 MDE corregido por subcuencas de la A1.

La Figura 3.1 presenta la distribución espacial de las cinco subcuencas sobre el MDE SRTM corregido, donde la gradación cromática representa la variación altimétrica del terreno. La escala altimétrica muestra un rango desde aproximadamente 50 msnm (tonalidades verdes) hasta 160 msnm (tonalidades amarillas-naranjas), evidenciando el gradiente topográfico característico de ambientes de llanura.

La configuración espacial revela que las subcuencas 1 y 2 ocupan las posiciones más septentrionales y occidentales del sistema, abarcando las mayores extensiones territoriales y presentando las formas más elongadas, como se evidencia tanto en los perfiles longitudinales (Figura 3.2) como en la delimitación de sus perímetros. La subcuenca 4 se localiza en posición intermedia, con una orientación preferencial este-oeste, mientras que las subcuencas 3 y 5 ocupan posiciones más meridionales y orientales, presentando formas más compactas coherentes con sus menores valores de longitud axial y mayores relaciones de circularidad (Horton, 1945; Verstappen, 1983).

3.3.2.1 Parámetros de forma

Los parámetros de forma constituyen indicadores que permiten comprender la dinámica hidrológica de una cuenca, y definen la manera en que se concentra la escorrentía superficial, por ende, influyen en la magnitud y forma del hidrograma resultante de un evento de precipitación (Gaspari *et al.*, 2013, 2025). En la cuenca A1, el análisis de estos parámetros revela características morfológicas distintivas entre las cinco subcuencas que la conforman (Tabla 3.5). A continuación, se describe el análisis de cada uno de estos parámetros:

La superficie de ocupación (A) de las subcuencas varía entre 597,78 km² y 7.582,47 km². Las subcuencas 1 y 2 tienen la mayor extensión territorial de la cuenca A1, representando el 80,8% de la

superficie total, con 7.582,47 km² y 6.764,17 km² respectivamente. La subcuenca 4 presenta un tamaño intermedio con 1.995,20 km², mientras que las subcuencas 3 y 5, ubicadas en zonas de transición y desembocadura respectivamente, son considerablemente más pequeñas con 597,78 km² y 798,01 km². Esta distribución de áreas refleja la configuración geomorfológica de la cuenca, donde las subcuencas de cabecera presentan mayor desarrollo territorial.

El perímetro (P) muestra una relación directa con la superficie de ocupación, variando entre 247,91 km y 1.152,42 km. Las subcuencas 1 y 2 presentan los perímetros más extensos (1.152,42 km y 1.014,08 km respectivamente), mientras que la subcuenca 3 registra el perímetro más reducido (247,91 km). Esta correspondencia entre superficie y perímetro indica una coherencia morfológica en el desarrollo de las unidades hidrológicas, como lo expresa López Cadenas de Llano (1998).

La longitud axial (La), presenta valores que oscilan entre 33,28 km y 252,87 km. La subcuenca 1 destaca con la mayor longitud axial (252,87 km), seguida por la subcuenca 2 (143,66 km) y la subcuenca 4 (92,93 km), mientras que las subcuencas 3 y 5 muestran longitudes considerablemente menores (33,28 km y 40,51 km respectivamente). Esta configuración longitudinal tiene implicaciones directas sobre el tiempo de concentración y la respuesta hidrológica de cada unidad (Gaspari, 2007).

El ancho promedio (AP), varía entre 17,96 km y 47,08 km. La subcuenca 2 presenta el mayor ancho promedio (47,08 km), indicando una forma más ensanchada en relación con su longitud, mientras que la subcuenca 3 muestra el menor valor (17,96 km). Las subcuencas 1, 4 y 5 presentan valores intermedios de 29,99 km, 21,47 km y 19,70 km respectivamente.

El factor de forma (Ff), constituye un indicador importante para evaluar la susceptibilidad a crecidas súbitas, como es el caso de la cuenca A1, donde los valores a nivel de subcuenca oscilan entre 0,12 y 0,54, revelando una marcada heterogeneidad morfológica. La descripción de este parámetro fue adaptada de Schumm (1956) y de Gaspari *et al.* (2013).

La subcuenca 1 presenta el valor más bajo de Ff (0,12), clasificándose como muy alargada, indica una forma extremadamente elongada que favorece tiempos de concentración prolongados y reduce la probabilidad de crecidas intensas, ya que los aportes de los diferentes tributarios no coinciden temporalmente en la desembocadura. La subcuenca 4, con un Ff de 0,23, se clasifica como alargada, presentando características similares, aunque en menor magnitud.

La subcuenca 2, con un Ff de 0,33, se clasifica como ligeramente alargada, representando una forma de transición que mantiene cierta elongación, pero con mayor tendencia al ensanchamiento. Esta configuración implica una respuesta hidrológica intermedia ante eventos de precipitación (Horton, 1945; Patel *et al.*, 2012).

Por su parte, las subcuencas 3 y 5 presentan valores de Ff de 0,54 y 0,49 respectivamente, clasificándose como ligeramente ensanchadas. Esta morfología indica una mayor propensión a generar crecidas más pronunciadas, dado que los aportes hídricos de diferentes sectores de la subcuenca tienden a concentrarse temporalmente en la desembocadura, aumentando los caudales pico.

El diámetro (D) varía entre 27,59 km y 98,26 km, siendo las subcuencas 1 y 2 las que presentan los mayores valores (98,26 km y 92,80 km respectivamente), coherente con sus mayores superficies de ocupación.

Los valores de Re en la cuenca A1 oscilan entre 0,39 y 0,83, permitiendo una clasificación más detallada de la morfología de cada unidad hidrológica. Las subcuencas 3 y 5 presentan los valores más elevados

de Re (0,83 y 0,79 respectivamente), clasificándose como ovaladas. Esta forma favorece una respuesta hidrológica más rápida y concentrada, con hidrogramas de crecida más pronunciados y tiempos de concentración reducidos. Las subcuencas 1, 2 y 4 muestran valores de Re de 0,39, 0,65 y 0,54 respectivamente, clasificándose como menos alargadas. Esta configuración, particularmente notoria en la subcuenca 1, implica una distribución temporal más extendida de los aportes hídricos, resultando en hidrogramas más atenuados y menor riesgo de crecidas súbitas (Strahler, 1964; Chopra *et al.*, 2005; Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

La relación de circularidad (R_c), presenta una amplia variabilidad entre las subcuencas, con valores que oscilan entre 0,23 y 2,81. Este índice proporciona información sobre la compacidad de la forma de la cuenca, donde valores cercanos a 1 indican mayor circularidad (Miller, 1953; Rai *et al.*, 2017). Las subcuencas 3 y 5 presentan los valores más elevados de R_c (2,81 y 2,26 respectivamente), indicando formas más compactas y redondeadas, que se traduce en una mayor eficiencia en la concentración de escurrimiento y menor tiempo de respuesta hidrológica. Por el contrario, las subcuencas 1 y 2 muestran valores bajos de R_c (0,23 y 0,62 respectivamente), reflejando formas más irregulares y alargadas, con mayor dispersión temporal de los aportes hídricos (Gaspari *et al.*, 2013).

En la cuenca A1, el K_c presenta valores que oscilan entre 2,86 y 3,73, clasificándose todas las subcuencas como rectangular-oblonga según la clasificación de Gravelius (1914). Este rango de valores indica formas considerablemente alejadas de la circularidad, que tiene importantes implicaciones hidrológicas.

La subcuenca 1 presenta el mayor valor de K_c (3,73), reflejando la forma más alargada e irregular del sistema. Este elevado coeficiente implica que la subcuenca tiene un perímetro considerablemente mayor que el de un círculo de área equivalente, que favorece tiempos de concentración prolongados y reduce la intensidad de las crecidas al distribuir temporalmente los aportes de diferentes sectores (Horton, 1945; López Cadenas de Llano, 1998).

La subcuenca 2 muestra un K_c de 3,48, seguida por la subcuenca 4 con 3,08, manteniendo formas alargadas, aunque con menor elongación que la subcuenca 1. Las subcuencas 5 y 3 presentan los valores más bajos de K_c (2,95 y 2,86 respectivamente), indicando formas más compactas dentro de la clasificación rectangular-oblonga. Aunque estas subcuencas mantienen cierto alargamiento, su morfología más compacta favorece una concentración más rápida de la escurrimiento y mayor susceptibilidad a crecidas intensas durante eventos de precipitación extraordinarios (Pandey *et al.*, 2004; Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

La integración de los parámetros de forma analizados permite establecer que la cuenca A1 presenta una marcada heterogeneidad morfológica entre sus subcuencas constituyentes. Las subcuencas 1 y 4, caracterizadas por formas muy alargadas a alargadas (F_f : 0,12 y 0,23), relaciones de elongación bajas (R_e : 0,39 y 0,54) y elevados coeficientes de compacidad (K_c : 3,73 y 3,08), presentan una configuración que favorece la atenuación de crecidas y mayor tiempo de respuesta hidrológica. Esta morfología es favorable desde el punto de vista de la gestión del riesgo hidrológico, reduciendo la probabilidad de inundaciones súbitas (Schumm, 1963; Nag & Chakraborty, 2003).

En contraste, las subcuencas 3 y 5, ubicadas en zonas de transición y desembocadura respectivamente, presentan formas ligeramente ensanchadas (F_f : 0,54 y 0,49), configuraciones ovaladas (R_e : 0,83 y 0,79) y menores coeficientes de compacidad (K_c : 2,86 y 2,95). Esta morfología más compacta implica una mayor eficiencia hidráulica en la concentración de escurrimiento, con tiempos de concentración

reducidos y mayor susceptibilidad a generar caudales pico elevados durante eventos de precipitación intensa o extraordinaria (Horton, 1945; Gaspari *et al.*, 2013).

La subcuenca 2 presenta características intermedias, clasificándose como ligeramente alargada (Ff: 0,33), con una relación de elongación de 0,65 y un Kc de 3,48, que sugiere un comportamiento hidrológico de transición entre las subcuencas marcadamente alargadas y las más compactas del sistema.

Esta variabilidad morfológica tiene implicaciones significativas para la planificación territorial y la gestión de recursos hídricos en la cuenca A1. Las subcuencas de forma alargada requieren estrategias de manejo enfocadas en la conservación de suelos y la regulación de caudales base, mientras que las subcuencas más compactas demandan una mayor atención en términos de control de crecidas, sistemas de alerta temprana y ordenamiento territorial que considere las zonas de riesgo de inundación (Javed *et al.*, 2011; Guzmán *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021).

Tabla 3.5. Resultados de los parámetros morfométricos de forma por subcuenca.

Parámetro	Subcuenca				
	1	2	3	4	5
Área - A (km ²)	7.582,47	6.764,17	597,78	1.995,20	798,01
Perímetro - P (km)	1.152,42	1.014,08	247,91	487,32	294,93
Longitud axial- La (km)	252,87	143,66	33,28	92,93	40,51
AP (ancho promedio)	29,99	47,08	17,96	21,47	19,70
Factor de forma - Ff	0,12	0,33	0,54	0,23	0,49
Clasificación - Ff	muy larga	ligeramente alargada	ligeramente ensanchada	alargada	ligeramente ensanchada
Diámetro km - D	98,26	92,80	27,59	50,40	31,88
Relación de elongación - Re	0,39	0,65	0,83	0,54	0,79
Clasificación - Re	menos alargada	menos alargada	ovalada	menos alargada	ovalada
Relación de circularidad - Rc	0,23	0,62	2,81	0,71	2,26
Índice de compacidad de Gravelius - Kc	3,73	3,48	2,86	3,08	2,95
Clasificación- Kc	rectangular- oblonga	rectangular- oblonga	rectangular- oblonga	rectangular- oblonga	rectangular- oblonga

3.3.2.2 Parámetros de relieve

En la cuenca A1, el análisis del relieve de la Tabla 3.6, revela características propias de un ambiente de llanura, donde las pendientes suaves dominan el paisaje. Las elevaciones máximas oscilan entre 81,30 y 143,23 msnm, mientras que las elevaciones mínimas varían entre 62,41 y 76,30 msnm. El relieve total (H) es moderado, variando entre 0,02 y 0,07 km, siendo las subcuencas 1 y 2 las que presentan los mayores desniveles con 0,07 y 0,06 km respectivamente.

La pendiente media de las subcuencas (PM) varía entre 0,90% y 1,18%, clasificándose en general como pendientes suaves características de ambientes de llanura. La subcuenca 5 presenta la mayor pendiente media (1,18%), seguida por la subcuenca 3 (1,09%), mientras que la subcuenca 1 muestra el valor más bajo (0,90%). Estas pendientes suaves favorecen los procesos de infiltración y reducen la

velocidad de escorrentía superficial, disminuyendo la capacidad erosiva del agua, aunque aumentan el riesgo de anegamiento en áreas deprimidas (Díaz Gómez & Gaspari, 2018).

El relieve relativo (Rr) presenta valores entre 0,006 y 0,012, siendo la subcuenca 3 la que muestra el valor más elevado (0,012), indicando una mayor relación entre el desnivel y el perímetro de la subcuenca. Este parámetro, junto con la relación de relieve (Rh) que varía entre 0,0003 y 0,0009, sugiere una baja susceptibilidad a procesos erosivos intensos en todas las subcuencas, aunque la variabilidad observada indica diferentes niveles de fragilidad morfométrica (Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

El coeficiente de rugosidad (Ra) oscila entre 0,0006 y 0,0029, clasificándose como morfología suave (bajo) en todas las subcuencas según Farhan *et al.* (2015). La subcuenca 2 presenta el valor más elevado (0,0029), seguida por la subcuenca 3 (0,0017), indicando una mayor sinuosidad y rugosidad del terreno en estas unidades hidrológicas. Los valores bajos de Ra en las subcuencas 1 y 4 (0,0012 y 0,0006 respectivamente) reflejan un terreno menos accidentado, con mayor suavidad en el relieve (Cruz *et al.*, 2015).

La integración de los parámetros de relieve permite establecer que la cuenca A1 presenta condiciones topográficas de baja a moderada fragilidad morfométrica, con predominancia de áreas aptas para actividades agropecuarias, aunque con necesidad de implementar medidas de conservación de suelos en las zonas de mayor pendiente para prevenir procesos degradativos (Biswas *et al.*, 1999; Guzmán *et al.*, 2021).

Tabla 3.6. Resultados de los parámetros morfométricos de relieve por subcuenca.

Parámetro	Subcuenca				
	1	2	3	4	5
Elevación máxima cuenca - Hmax (msnm)	143,23	130,52	102,30	116,60	81,30
Elevación mínima cuenca - Hmin (msnm)	76,30	74,10	72,30	72,30	62,41
Desnivel- H (km)	0,07	0,06	0,03	0,04	0,02
Pendiente media de la cuenca - PM (%)	0,90	0,93	1,09	0,98	1,18
Relieve relativo -Rr	0,006	0,006	0,012	0,009	0,006
Relación relieve - Rh	0,0003	0,0004	0,0009	0,0005	0,0005
Coeficiente de rugosidad - Ra	0,0012	0,0029	0,0017	0,0006	0,0010
Clasificación- Ra	bajo	bajo	bajo	bajo	bajo

En relación con los parámetros de relieve, se plantearon los perfiles longitudinales como se observan en la Figura 3.2, para las cinco subcuencas que conforman la cuenca A1, junto con su distribución espacial sobre el modelo digital de elevación (MDE). Estos perfiles topográficos representan la variación altitudinal desde las zonas de cabecera hasta las áreas de desembocadura de cada unidad hidrológica, permitiendo visualizar las características del relieve y la configuración morfológica del sistema (Leopold & Maddock, 1953; Hack, 1957).

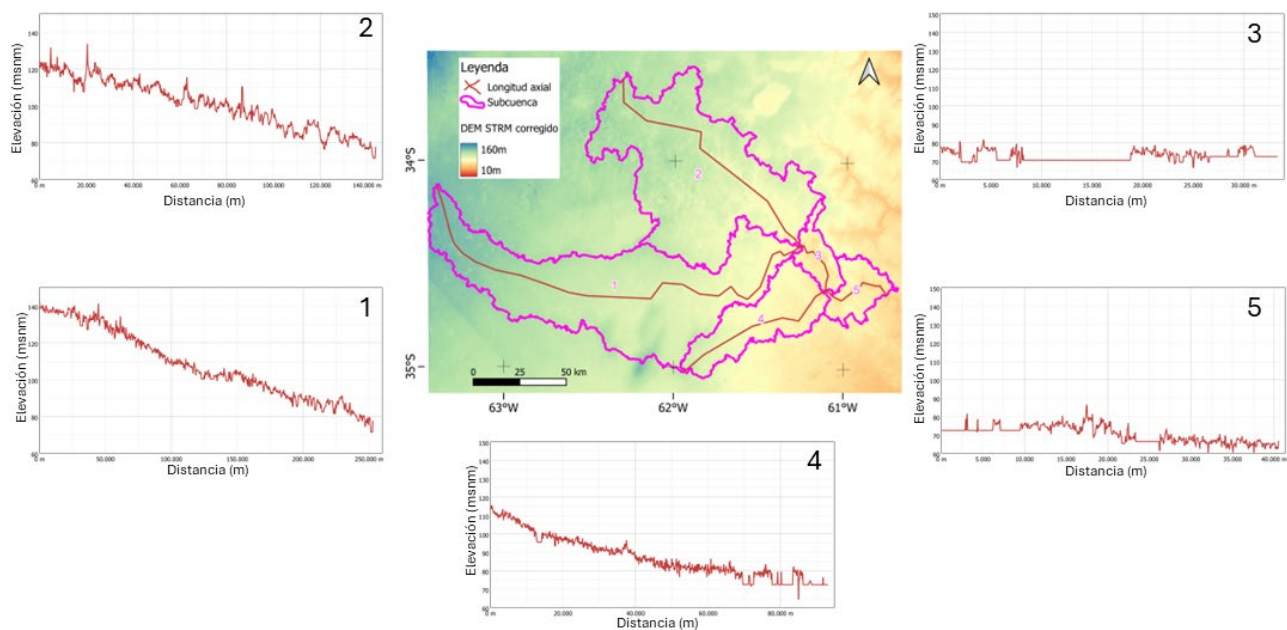


Figura 3.2 Perfiles longitudinales de la longitud axial de cada subcuenca.

El perfil longitudinal de la subcuenca 1 muestra una configuración distintivamente elongada, con una extensión horizontal aproximada de 250 km, coherente con su elevada longitud axial (252,87 km). El perfil presenta un gradiente descendente suave pero sostenido, iniciando en elevaciones de 143,23 msnm y descendiendo progresivamente hasta aproximadamente 76,30 msnm. La morfología del perfil evidencia un relieve con múltiples fluctuaciones de menor magnitud a lo largo de su recorrido, características de ambientes de llanura ondulada, donde predominan pendientes suaves interrumpidas ocasionalmente por lomadas de baja amplitud.

La subcuenca 2 exhibe un perfil longitudinal con una extensión aproximada de 140 km, presentando una configuración morfológica similar a la subcuenca 1, aunque con una mayor densidad de fluctuaciones altimétricas en su sector inicial. El perfil inicia en elevaciones cercanas a 130 msnm y desciende gradualmente hasta aproximadamente 74 msnm, indicando la presencia de ondulaciones más pronunciadas en el tercio superior del perfil.

El perfil longitudinal de la subcuenca 3 presenta la menor extensión horizontal del conjunto, con aproximadamente 35 km de longitud. A diferencia de las subcuencas anteriores, este perfil muestra una configuración notablemente más uniforme y horizontal, con elevaciones que oscilan entre los 72-102 msnm a lo largo de su extensión. Esta característica morfológica refleja la condición de transición de esta subcuenca, ubicada en zonas más bajas y planas del sistema, donde los procesos de sedimentación han generado una topografía extremadamente suave.

La subcuenca 4 muestra un perfil longitudinal de extensión intermedia, aproximadamente 90 km, con una configuración que inicia en elevaciones cercanas a 116 msnm y desciende progresivamente hasta los 72 msnm. El perfil presenta una gradiente más uniforme en comparación con las subcuencas 1 y 2, con ondulaciones de menor amplitud y frecuencia, que sugiere un relieve más homogéneo y condiciones de sedimentación más estables (Hack, 1973; Goldrick & Bishop, 2007).

El perfil longitudinal de la subcuenca 5, correspondiente a la zona de desembocadura, presenta una extensión aproximada de 40 km y se caracteriza por iniciar en elevaciones relativamente bajas (81

msnm) y descender hasta los 62 msnm. El perfil exhibe múltiples fluctuaciones de menor magnitud a lo largo de su recorrido, con una mayor variabilidad altimétrica en su sector medio, que puede estar asociado a la presencia de paleocauces, áreas de acumulación sedimentaria diferencial o efectos de la dinámica fluvial histórica en zonas próximas a la desembocadura.

3.3.2.3 Parámetros de drenaje

Los parámetros de drenaje analizados en la cuenca A1 revelan características distintivas de su configuración hidrológica (Tabla 3.7). La red de drenaje presenta un patrón dendrítico natural de orden máximo 3, con una distribución espacial heterogénea que refleja las condiciones geomorfológicas y litológicas del territorio.

La longitud total de la red de drenaje (L_u) varía significativamente entre las subcuencas, siendo las subcuencas 2 y 5 las que presentan los mayores valores con 346,13 km y 42,27 km respectivamente, mientras que la subcuenca 4 registra el valor más bajo con 24,85 km. Esta distribución está directamente relacionada con la superficie de ocupación y las características topográficas de cada unidad hidrológica.

La densidad de drenaje (D_d) presenta valores que oscilan entre 0,01 y 0,06 km/km², clasificándose en todas las subcuencas como extremadamente baja según los criterios de Cassettari y Queiroz (2019). Los valores más elevados se registran en las subcuencas 3 (0,06 km/km²) y 2 y 5 (0,05 km/km²), mientras que las subcuencas 1 y 4 muestran los valores más reducidos (0,02 y 0,01 km/km² respectivamente). Esta baja densidad de drenaje es característica de regiones con materiales permeables, cobertura vegetal significativa y relieve moderado, favoreciendo la infiltración sobre la escorrentía superficial (Strahler, 1964; López Cadenas de Llano, 1998).

La constante de mantenimiento del canal (C), definida como la inversa de la densidad de drenaje, presenta valores que varían entre 17,26 y 80,29, clasificándose como muy baja en todas las subcuencas. El valor más elevado se observa en la subcuenca 4 (80,29), indicando la mayor área necesaria para mantener un metro de canal, mientras que la subcuenca 3 presenta el valor más bajo (17,26). Estos resultados sugieren condiciones ambientales que requieren áreas considerables para el desarrollo y mantenimiento de los cauces (Horton, 1945; Schumm, 1956).

La longitud del flujo terrestre (L_o) muestra un patrón coherente con la densidad de drenaje, registrando valores entre 8,63 y 40,14. La subcuenca 4 presenta el valor más elevado (40,14), evidenciando las mayores distancias que debe recorrer el agua sobre el terreno antes de concentrarse en un canal definido, dando mayor tiempo de infiltración y menor escorrentía superficial inmediata.

La longitud del cauce principal (L) varía considerablemente entre las subcuencas, siendo las subcuencas 2 y 1 las que presentan los cauces más extensos con 138,91 km y 123,43 km respectivamente, mientras que la subcuenca 4 registra el menor valor con 24,85 km. Esta variabilidad está estrechamente relacionada con la forma y dimensiones de cada subcuenca (Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

La pendiente media del cauce principal (PMC) oscila entre 0,005% y 0,041%, siendo notablemente baja en todas las unidades hidrológicas, característica propia de ambientes de llanura. La subcuenca 4 presenta la mayor pendiente (0,041%), que se traduce en una mayor capacidad de transporte de sedimentos y velocidad de flujo, mientras que la subcuenca 3 muestra la pendiente más suave

(0,005%), favoreciendo procesos de sedimentación y menor energía del flujo (Venkatesh & Anshumali, 2019).

El análisis de la jerarquización de cauces mediante el método de Strahler (1964) revela que la cuenca A1 alcanza un orden máximo de 3 (Figura 3.3). Las subcuencas 2, 3 y 5 alcanzan orden 3, mientras que las subcuencas 1 y 4 presentan órdenes máximos de 2 y 1 respectivamente. Esta distribución de órdenes refleja el grado de desarrollo y complejidad de la red de drenaje, siendo indicativo del nivel de organización hidrológica del sistema (Horton, 1945; Strahler, 1957).

El número total de cauces (Nu) varía desde 1 hasta 17, concentrándose la mayor cantidad en la subcuenca 2 (17 cauces), seguida por la subcuenca 1 (3 cauces). Esta distribución indica una mayor disección del terreno en las áreas donde se concentran más cauces, reflejando una mayor respuesta hidrológica a los eventos de precipitación (Singh *et al.*, 2021).

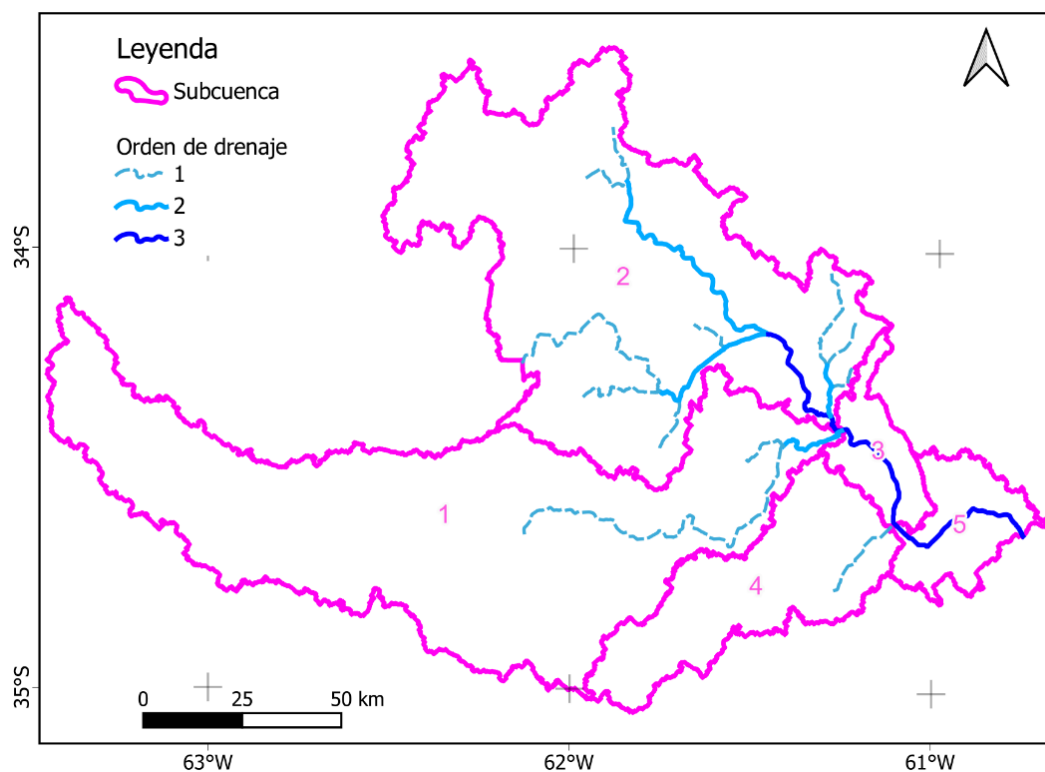


Figura 3.3 Red y orden de drenaje de la cuenca A1.

El coeficiente de torrencialidad (Ct), que relaciona el número de cauces de primer orden con el área de la subcuenca, presenta valores que oscilan entre 0,0003 y 0,0013. Los valores más elevados se registran en la subcuenca 2 (0,0013), indicando una mayor capacidad de generación de escorrentía superficial concentrada durante eventos de precipitación intensa. Las subcuencas 3 y 5 presentan valores nulos debido a la ausencia de cauces de primer orden en su configuración actual (Gaspari *et al.*, 2013).

La frecuencia de cauces (Fs) muestra valores bajos en todas las subcuencas, oscilando entre 0,0004 y 0,0025. La subcuenca 2 presenta la mayor frecuencia (0,0025), seguida por la subcuenca 3 (0,0017), mientras que la subcuenca 1 registra el valor más bajo (0,0004). Estos valores bajos son coherentes

con la baja densidad de drenaje observada, reflejando un terreno con moderada capacidad de infiltración y baja generación de escorrentía superficial (Michalijos & Zapperi, 2015).

La textura de drenaje (T), que integra la densidad de drenaje y la frecuencia de cauces, presenta valores extremadamente bajos (entre 0,000006 y 0,000129), clasificándose como muy gruesa en todas las subcuencas según los criterios de Smith (1950). La subcuenca 2 muestra el valor más elevado (0,000129), indicando una textura relativamente más fina en comparación con las demás unidades, mientras que la subcuenca 4 presenta el valor más bajo (0,000006), denotando la textura más gruesa del sistema. Esta característica de textura muy gruesa es típica de regiones con materiales permeables, vegetación desarrollada y relieves suaves, donde predominan los procesos de infiltración sobre la escorrentía superficial (Horton, 1945).

3.3.2.4 Interpretación integrada

La integración de los parámetros de drenaje analizados permite establecer que la cuenca A1 presenta un sistema hidrológico caracterizado por una baja capacidad de drenaje superficial, con predominancia de procesos de infiltración sobre escorrentía directa. La clasificación de densidad y textura de drenaje como extremadamente baja y muy gruesa respectivamente, junto con los bajos valores de frecuencia de cauces, indican un ambiente con moderada a baja susceptibilidad a procesos erosivos intensos, pero con potencial de acumulación de agua durante eventos de precipitación prolongados o extraordinarios (Khurana *et al.*, 2020; Chowdary *et al.*, 2013).

La variabilidad espacial observada en los parámetros de drenaje entre subcuencas refleja las diferencias geomorfológicas y topográficas del territorio, siendo las subcuencas 2 y 3 las que presentan mayor desarrollo de la red de drenaje y, consecuentemente, mayor capacidad de respuesta hidrológica. Por el contrario, las subcuencas 1 y 4, con menores densidades de drenaje y mayores constantes de mantenimiento, requieren mayores áreas para la formación de cauces definidos.

Tabla 3.7. Resultados de los parámetros morfométricos de drenaje por subcuenca.

	Subcuenca				
	1	2	3	4	5
Longitud de la red de drenaje - Lu (km)	136,86	346,13	34,63	24,85	42,27
Densidad de drenaje - Dd (km/km ²)	0,02	0,05	0,06	0,01	0,05
Clasificación - Dd	extremadamente baja	extremadamente baja	extremadamente baja	extremadamente baja	extremadamente baja
Const. mantenimiento del canal - C	55,40	19,54	17,26	80,29	18,88
Clasificación - C	muy baja	muy baja	muy baja	muy baja	muy baja
Longitud del flujo terrestre - Lu	27,70	9,77	8,63	40,14	9,44
Longitud del cauce principal - L (km)	123,43	138,91	34,63	24,85	42,27
Altura máxima del cauce (m)	99,30	105,48	74,10	82,44	72,36
Altura mínima del cauce (m)	76,30	74,10	72,36	72,36	62,41
Pendiente media cauce principal-PMC (%) (J)	0,019	0,023	0,005	0,041	0,024
Pendiente media del cauce principal- J (m/m)	0,00019	0,00023	0,00005	0,00041	0,00024
Orden de cauce máximo	2	3	3	1	3
Número de cauces - Nu	3	17	1	1	1
Número de cauces de primer orden- Nu1	2	9	-	1	-
Coefficiente de torrencialidad - Ct	0,0003	0,0013	-	0,0005	-
Textura de drenaje - T	0,000007	0,000129	0,000097	0,000006	0,000066
Clasificación - T	muy gruesa	muy gruesa	muy gruesa	muy gruesa	muy gruesa
Frecuencia de cauce - Fs	0,0004	0,0025	0,0017	0,0005	0,0013
Clasificación - Fs	baja	baja	baja	baja	baja

La integración de los perfiles longitudinales con la distribución espacial de las subcuencas permite confirmar las características morfométricas cuantificadas en los parámetros de forma. Las subcuencas 1 y 4, con sus extensos perfiles longitudinales y gradientes suaves sostenidas, corroboran su clasificación como muy alargada y alargada respectivamente (Gaspari, 2007; Guzmán *et al.*, 2021).

Por el contrario, las subcuencas 3 y 5, con perfiles longitudinales más cortos y configuraciones espaciales más compactas, confirman su mayor eficiencia hidráulica en la concentración de escorrentía, con respuestas hidrológicas más rápidas ante eventos de precipitación. La subcuenca 2 presenta características intermedias, con un perfil longitudinal que refleja tanto rasgos de elongación

como sectores de mayor compacidad, coherente con su clasificación como ligeramente alargada (Singh *et al.*, 2021).

Las pendientes suaves observadas en todos los perfiles longitudinales, características de ambientes de llanura, implican velocidades de flujo moderadas que favorecen la infiltración y reducen la capacidad erosiva de la escorrentía superficial, aunque también incrementan los tiempos de residencia del agua y la susceptibilidad a procesos de anegamiento en áreas topográficamente deprimidas (Zavoianu, 1985; Díaz Gómez & Gaspari, 2018).

3.3.3 Priorización morfométrica

La aplicación de la metodología multicriterio de priorización morfométrica propuesta por Abdeta *et al.* (2020), Arulbalaji y Padmalal (2020) y Jothimani *et al.* (2020) permitió identificar y jerarquizar las subcuencas de la cuenca A1 según su susceptibilidad a procesos de degradación por erosión y excesos hídricos. Los resultados del análisis integrado de catorce parámetros morfométricos (cuatro de forma, cuatro de relieve y seis de drenaje) se sintetizan en la Tabla 3.8, donde se presentan los rangos asignados a cada parámetro por subcuenca y los valores del Parámetro Compuesto Morfométrico (PCM) resultantes. La escala de valores va de 1 a 5, siendo el 1 el valor con mayor ponderación, representándose en colores de la siguiente manera:

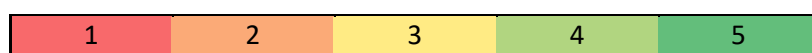


Tabla 3.8. Valores de parámetros morfométricos que intervienen en el cálculo de los valores parámetro compuesto para morfometría (PCM) y priorización de subcuencas.

Parámetro		1	2	3	4	5
Forma	Factor de forma Ff	5	3	1	4	2
	Relación de elongación Re	5	3	1	4	2
	Relación de circularidad Rc	5	4	1	3	2
	Índice de compacidad de Gravelius Kc	5	4	1	3	2
Relieve	Pendiente media PM	5	4	2	3	1
	Relieve relativo Rr	4	5	1	2	3
	Relación relieve Rh	5	4	1	2	3
	Coefficiente de rugosidad Ra	3	1	2	5	4
Drenaje	Densidad de drenaje Dd	4	3	1	5	2
	Longitud del flujo terrestre Lo	2	3	5	1	4
	Constante de mantenimiento del canal C	4	3	1	5	2
	Coefficiente de torrencialidad Ct	5	3	1	4	2
	Textura de drenaje T	4	1	2	5	3
	Frecuencia de cauce Fs	5	1	2	4	3
PARÁMETRO COMPUESTO PARA MORFOMETRÍA (PCM)		4,36	3,00	1,57	3,57	2,50
NIVEL DE PRIORIZACIÓN		BAJA	MEDIA	ALTA	BAJA	MEDIA

Tabla 3.9. Umbrales de clasificación y categorización de subcuencas

Categoría	Rango de PCM	Subcuencas	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Alta prioridad	< 2,50	3	597,78	3,37
Prioridad media	2,50 - 3,43	2, 5	9.557,38	54,00
Baja prioridad	> 3,43	1, 4	7.582,47	42,63

Con base en el método de intervalos uniformes aplicado (amplitud de clase = 0,93), se establecieron tres categorías de priorización: alta prioridad (PCM < 2,50), prioridad media ($2,50 \leq \text{PCM} < 3,43$) y baja prioridad ($\text{PCM} \geq 3,43$). (Tabla 3.9). Esta clasificación permite identificar objetivamente las unidades hidrológicas que demandan intervención prioritaria para la conservación de recursos hídricos y edáficos. La distribución superficial resultante indica que el 3,37% del área total corresponde a alta prioridad, el 54,00% a prioridad media y el 42,63% a baja prioridad.

Los valores de PCM obtenidos oscilan entre 1,57 y 4,36, reflejando una variabilidad considerable en la fragilidad morfométrica entre las cinco subcuencas analizadas. La subcuenca 3 registra el valor más bajo de PCM (1,57), indicando la mayor fragilidad morfométrica del sistema, mientras que la subcuenca 1 presenta el valor más elevado (4,36), correspondiendo a la menor vulnerabilidad relativa. Las subcuencas 4 y 1 muestran valores superiores a 3,43, clasificándose como de baja prioridad, mientras que las subcuencas 2 y 5 presentan valores intermedios (3,00 y 2,50 respectivamente), ubicándose en una condición de fragilidad moderada.

3.3.3.1 Subcuenca de alta prioridad (Subcuenca 3)

La subcuenca 3, con un PCM de 1,57, se clasifica como de alta prioridad, requiriendo la implementación inmediata de planes de manejo integral para su conservación. La subcuenca presenta una forma compacta, evidenciada por sus valores desfavorables en el factor de forma, relación de elongación, relación de circularidad e índice de compacidad de Gravelius, que favorece la concentración rápida de escorrentía y la generación de caudales pico elevados durante eventos de precipitación intensa (Singh *et al.*, 2021). Adicionalmente, sus parámetros de relieve indican mayor energía disponible para procesos erosivos. Esta combinación de características morfométricas desfavorables posiciona a la subcuenca 3 como la unidad hidrológica más vulnerable del sistema, demandando la implementación prioritaria de prácticas de conservación de suelos, manejo de cobertura vegetal y obras de control de torrentes para mitigar el riesgo de erosión acelerada y crecidas súbitas (Abdeta *et al.*, 2020; Jothimani *et al.*, 2020).

3.3.3.2 Subcuencas de prioridad media (Subcuencas 2 y 5)

Las subcuencas 2 y 5 se clasifican como de prioridad media, presentando una fragilidad morfométrica moderada que requiere la implementación de estrategias de manejo preventivo y monitoreo continuo. Esta categorización refleja una combinación heterogénea de parámetros morfométricos donde algunos indicadores sugieren mayor fragilidad mientras que otros reflejan condiciones más estables, resultando en una vulnerabilidad intermedia que demanda atención para prevenir su degradación progresiva. Conjuntamente, estas dos subcuencas representan el 54,00% de la superficie total de la cuenca A1, constituyendo más de la mitad del área de estudio.

La subcuenca 2 (PCM = 3,00) muestra fragilidad moderada, destacándose por presentar un terreno con alta rugosidad (rango 1) y elevada frecuencia de cauces, características que favorecen una respuesta hidrológica rápida ante eventos de precipitación. Sin embargo, su morfología ligeramente alargada, evidenciada en los parámetros de forma ($Ff = 3$, $Re = 3$, $Kc = 4$), atenúa parcialmente esta fragilidad al distribuir temporalmente los aportes hídricos. Los parámetros de relieve muestran condiciones favorables con pendientes moderadas ($PM = 4$) y relieve relativo elevado ($Rr = 5$), aunque el bajo coeficiente de rugosidad indica cierta vulnerabilidad. Esta subcuenca requiere la implementación de prácticas agrícolas conservacionistas, especialmente en áreas de pendientes moderadas donde la alta frecuencia de cauces puede intensificar procesos erosivos si no se mantiene una adecuada cobertura vegetal (Guzmán *et al.*, 2021).

Subcuenca 5 (PCM = 2,50), ubicada en el límite inferior de la categoría de prioridad media, exhibe mayor fragilidad relativa dentro de este grupo. Su configuración morfométrica muestra una forma más compacta ($Ff = 2$, $Re = 2$, $Rc = 2$, $Kc = 2$), favoreciendo cierta concentración de escorrentía ante eventos de precipitación. Los parámetros de relieve revelan la menor pendiente media del sistema ($PM = 1$), esto podría incrementar la susceptibilidad a anegamientos, aunque compensado por valores moderados en relieve relativo y relación de relieve. Su ubicación en la zona de desembocadura, donde las condiciones de menor pendiente compensan parcialmente su forma menos alargada, explica su clasificación en prioridad media. Esta subcuenca demanda especial atención en el manejo de zonas riparias y el control de procesos de sedimentación en áreas de transición entre la llanura y los cauces principales, donde la convergencia de flujos puede generar vulnerabilidad localizada (Arulbalaji & Padmalal, 2020; Singh *et al.*, 2021).

3.3.3.3 Subcuencas de baja prioridad (Subcuencas 1 y 4)

Las subcuencas 1 y 4, con valores de PCM de 4,36 y 3,57 respectivamente, se clasifican como de baja prioridad, indicando menor susceptibilidad relativa a procesos de degradación por erosión e inundaciones. En conjunto, estas subcuencas representan el 42,63% de la superficie total de la cuenca A1, configurando una importante extensión territorial con condiciones morfométricas favorables para la estabilidad hidrológico-ambiental.

La subcuenca 1 (PCM = 4,36) presenta la menor fragilidad morfométrica del sistema. Esta clasificación favorable se sustenta en una configuración morfométrica que integra múltiples factores protectores contra la degradación hidrológico-ambiental. La subcuenca exhibe una forma muy alargada, evidenciada por valores óptimos en todos los parámetros de forma ($Ff = 5$, $Re = 5$, $Rc = 5$, $Kc = 5$), que favorece la distribución temporal de los aportes hídricos y reduce significativamente la magnitud de los caudales pico durante eventos de precipitación (Horton, 1945; Schumm, 1956). Sus características de relieve muestran pendientes suaves ($PM = 5$) con relieve relativo moderado ($Rr = 4$) y relación de relieve elevada ($Rh = 5$), implicando menor energía disponible para procesos erosivos y mayor tiempo de concentración. Los parámetros de drenaje confirman una baja torrencialidad ($Ct = 5$) y elevada frecuencia de cauces ($Fs = 5$), indicando una red bien distribuida, pero con baja capacidad de generación de flujos concentrados intensos. Esta subcuenca, que ocupa la mayor extensión territorial individual, requiere prácticas agrícolas sustentables que mantengan su condición favorable a largo plazo (Díaz Gómez & Gaspari, 2018).

La subcuenca 4 (PCM = 3,57), recientemente reclasificada como de baja prioridad tras la corrección de los parámetros Kc y C , presenta la segunda menor fragilidad del sistema. Su configuración

morfométrica muestra valores favorables en múltiples parámetros, destacándose por presentar la mejor condición en el coeficiente de rugosidad ($R_a = 5$), densidad de drenaje ($D_d = 5$), longitud del flujo terrestre ($L_o = 1$), constante de mantenimiento del canal ($C = 5$), textura de drenaje ($T = 5$) y frecuencia de cauces ($F_s = 4$). Estos valores indican un terreno poco diseccionado con baja rugosidad y densidad de drenaje reducida, indicando menor susceptibilidad a erosión intensa y mayor tiempo de concentración (Jothimani *et al.*, 2020). Los parámetros de forma muestran una configuración alargada ($F_f = 4$, $R_e = 4$) con compacidad moderada ($K_c = 3$), contribuyendo a la atenuación de crecidas. A pesar de su clasificación favorable, esta subcuenca requiere monitoreo continuo y la implementación de medidas conservacionistas preventivas en zonas de cultivo intensivo para preservar su estabilidad morfométrica (Strahler, 1964; Singh *et al.*, 2021).

3.3.4 Análisis espacial de la fragilidad morfométrica

La distribución espacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca A1, representada en la Figura 3.4, revela patrones geográficos significativos que reflejan la influencia de la topografía, la configuración de la red de drenaje y las características geomorfológicas del territorio. La subcuenca de alta prioridad (subcuenca 3), que representa apenas el 3,37% de la superficie total, se localiza en la zona oriental de la cuenca, caracterizada por una configuración más compacta y condiciones de drenaje que favorecen la concentración rápida de escorrentía.

Las subcuencas de prioridad media (2 y 5), que conjuntamente abarcan el 54% del área de estudio, presentan una distribución espacial que refleja condiciones de transición morfométrica. La subcuenca 2, ubicada en la porción norte-central, ocupa la mayor extensión dentro de esta categoría, mientras que la subcuenca 5 se sitúa en el sector de desembocadura, donde las pendientes más suaves compensan parcialmente su morfología compacta.

Las subcuencas de baja prioridad (1 y 4), que representan el 42,63% de la superficie total, dominan las porciones occidental y central-sur de la cuenca. La subcuenca 1, que constituye la unidad hidrológica de mayor extensión individual, ocupa predominantemente áreas de llanura con pendientes suaves y morfología extremadamente alargada. La subcuenca 4 se distribuye en la zona central-sur, presentando características morfométricas igualmente favorables para la estabilidad del sistema.

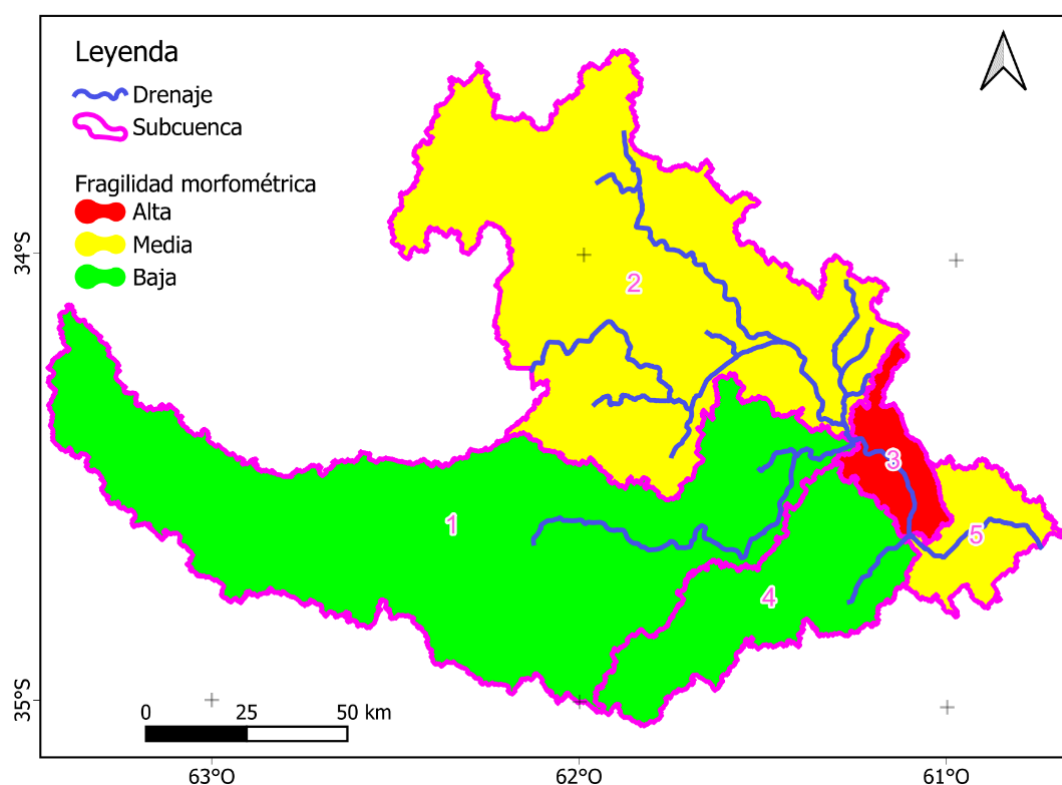


Figura 3.4 Nivel de priorización morfométrica de las subcuencas de la A1.

En concordancia con Arulbalaji y Padmalal (2020), el método geoespacial integrado empleado para delimitar y priorizar las subcuencas de la cuenca A1 constituye una herramienta eficaz que mejora significativamente la comprensión de la variabilidad espacial de la fragilidad morfométrica. La Figura 3.4 evidencia que existe una relación directa entre la fragilidad y la configuración topográfica del terreno, particularmente con la distribución de formas de cuenca, el grado de desarrollo de la red de drenaje y las características del relieve.

Este análisis espacial permitió identificar zonas críticas donde se concentran las mayores vulnerabilidades, facilitando la toma de decisiones para la asignación eficiente de recursos en programas de conservación y manejo integral de la cuenca. La jerarquización obtenida constituye una base técnica sólida para el desarrollo de estrategias diferenciadas de intervención según el nivel de prioridad de cada subcuenca, optimizando la efectividad de las acciones de conservación y restauración hidrológico-ambiental (Abdeta *et al.*, 2020; Jothimani *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2021).

La metodología morfométrica multicriterio aplicada en la cuenca A1 demuestra su efectividad como herramienta de planificación territorial, permitiendo una jerarquización objetiva y espacialmente explícita de las subcuencas según su fragilidad hidrológico-ambiental. Los resultados obtenidos constituyen un insumo fundamental para el diseño de políticas de ordenamiento territorial y la implementación de programas de conservación de suelos y recursos hídricos adaptados a las condiciones específicas de cada unidad hidrológica, contribuyendo al desarrollo sustentable de la región.

La caracterización morfométrica constituye una herramienta fundamental para comprender la dinámica hidrológica de las cuencas hidrográficas y su respuesta ante eventos de precipitación,

permitiendo establecer niveles de fragilidad y susceptibilidad a procesos de degradación (Guzmán *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021). En el estudio de la cuenca A1, la aplicación de técnicas de detección remota y sistemas de información geográfica (SIG) facilitó la cuantificación de parámetros morfométricos, caracterizando una unidad hidrológica representativa de ambientes de llanura en la región pampeana argentina, revelando características distintivas que condicionan su comportamiento hidrológico.

La implementación de técnicas de detección remota y SIG demostró ser fundamental para la caracterización morfométrica de la cuenca A1, particularmente en un ambiente de llanura donde las diferencias topográficas son sutiles y requieren alta precisión altimétrica. El uso del modelo digital de elevación SRTM corregido permitió identificar variaciones topográficas significativas, determinantes para establecer la configuración del drenaje superficial. Guevara Ochoa *et al.* (2019) destacan que en ambientes de muy baja pendiente como la llanura pampeana, la precisión vertical del MDE es crítica para definir correctamente las divisorias de aguas y la red de drenaje, ya que errores mínimos en la altimetría pueden resultar en delimitaciones erróneas de cuencas.

Arulbalaji y Padmalal (2020) y Singh *et al.* (2021) reportan experiencias exitosas en la aplicación de SIG para priorización de cuencas en ambientes montañosos, donde las diferencias topográficas son pronunciadas y las redes de drenaje bien definidas. Sin embargo, la aplicación de estas metodologías en ambientes de llanura presenta desafíos particulares asociados a la escasa diferenciación topográfica, la presencia de redes de drenaje difusas o indefinidas, y la existencia de depresiones cerradas sin drenaje superficial aparente (Brendel *et al.*, 2017; Pereyra *et al.*, 2018). En el presente estudio, estos desafíos fueron abordados mediante la corrección manual de la red de drenaje a partir del análisis de series temporales de imágenes satelitales Sentinel 2 y verificación de campo, metodología que permitió ajustar la configuración de cauces temporales y áreas de acumulación preferencial de escorrentía.

3.3.5 Particularidades morfométricas de ambientes de llanura

Los resultados obtenidos en la cuenca A1 evidencian características morfométricas típicas de sistemas de llanura que contrastan con las encontradas en cuencas montañosas, como lo expresan Guzmán *et al.* (2021), Khurana *et al.* (2020) y Cruz *et al.* (2015). Esta diferencia sustancial en la pendiente determina comportamientos hidrológicos fundamentalmente distintos: mientras las cuencas montañosas presentan respuestas rápidas con alta energía erosiva y torrencialidad pronunciada, los ambientes de llanura como la cuenca A1 se caracterizan por respuestas lentas, baja energía de flujo y predominancia de procesos de infiltración sobre escorrentía concentrada, como lo expresan diversos autores como Kruse y Laurencena (2005) y Romanelli *et al.* (2010).

La densidad de drenaje extremadamente baja de la cuenca A1 (0,03 km/km²) se sitúa considerablemente por debajo de los valores reportados en cuencas serranas, donde Guzmán *et al.* (2021) encontraron valores entre 0,15 y 0,45 km/km² en la cuenca del río Sauce Chico, Singh *et al.* (2021) registraron 0,52-0,89 km/km² en la cuenca de Dudhnai, India, y Venkatesh y Anshumali (2019) obtuvieron 0,28-0,65 km/km² en la cuenca del río Betwa, India central. Está marcada diferencia refleja las condiciones geomorfológicas y litológicas propias de las llanuras pampeanas, donde materiales sedimentarios de alta permeabilidad, relieves extremadamente suaves y cobertura de suelos

profundos favorecen la infiltración y dificultan el desarrollo de redes de drenaje densas (Kruse & Laurencena, 2005; Hurtado *et al.*, 2006; Kuppel *et al.*, 2015; Guevara Ochoa *et al.*, 2019).

Estudios en ambientes de llanura similares a la cuenca A1, como los realizados por Brendel *et al.* (2017) en cuencas de la llanura chaco-pampeana argentina, reportan densidades de drenaje igualmente bajas ($0,02-0,05 \text{ km/km}^2$), corroborando que esta característica es típica de sistemas fluviales en ambientes de muy baja pendiente. Forte Lay *et al.* (2008) observaron patrones comparables en la cuenca del río Salado bonaerense, con densidades de drenaje inferiores a $0,10 \text{ km/km}^2$, asociadas a la presencia de depresiones topográficas que favorecen la acumulación temporal de agua en lugar de su evacuación rápida por cauces definidos. Esta condición morfométrica tiene implicaciones fundamentales para la gestión del recurso hídrico, ya que determina tiempos de residencia prolongados y mayor susceptibilidad a anegamientos que a procesos erosivos intensos.

3.3.6 Morfología de cuenca y respuesta hidrológica

El factor de forma de la cuenca A1 ($Ff = 0,17$) y el coeficiente de compacidad de Gravelius ($Kc = 3,97$) indican una morfología extremadamente alargada, más pronunciada que la reportada por Guzmán *et al.* (2021) en subcuencas serranas ($Kc = 1,8-2,5$) o por Michalijos y Zapperi (2015) en cuencas de las Sierras Australes bonaerenses ($Kc = 1,5-2,0$). Esta configuración alargada constituye un factor favorable desde la perspectiva del riesgo hidrológico, ya que reduce significativamente la probabilidad de coincidencia temporal de aportes de diferentes sectores de la cuenca, atenuando los caudales pico y disminuyendo la susceptibilidad a crecidas súbitas (Gaspari *et al.*, 2013, 2025).

Sin embargo, la combinación de forma alargada con pendientes extremadamente suaves genera una condición hidrológica particular: mientras la morfología favorece la atenuación de crecidas, las bajas pendientes favorecen a la vulnerabilidad a inundaciones por saturación durante eventos de precipitación prolongados o secuencias de tormentas. Pereyra (2018) reportó comportamientos similares en cuencas de llanura pampeana, donde las pendientes muy bajas y el relieve alargado que resultan en hidrogramas extremadamente atenuados pero sostenidos, con dificultades para la evacuación eficiente del agua acumulada.

En relación con los parámetros de relieve y susceptibilidad erosiva, el coeficiente de rugosidad ($Ra = 0,0027$) obtenido en la cuenca A1 se clasifica como bajo según Farhan *et al.* (2015), indicando un terreno con escasa sinuosidad y suavidad topográfica que contrasta con los valores elevados reportados en cuencas montañosas. Guzmán *et al.* (2021) encontraron coeficientes de rugosidad entre $0,15$ y $0,45$ en subcuencas serranas del río Sauce Chico, mientras que García Martínez *et al.* (2016) reportaron valores superiores a $0,30$ en el arroyo La Ventana, ambos sistemas con relieve pronunciado y alta capacidad erosiva. Esta diferencia indica que la cuenca A1 presenta baja susceptibilidad a erosión hídrica concentrada y formación de cárcavas, aunque no elimina completamente el riesgo de erosión laminar difusa en sectores con cobertura vegetal degradada o uso agrícola intensivo sin prácticas conservacionistas (Díaz Gómez & Gaspari, 2018).

El relieve relativo ($Rr = 0,004$) y la relación de relieve ($Rh = 0,0002$) de la cuenca A1 son órdenes de magnitud inferiores a los valores reportados en cuencas serranas, donde Khurana *et al.* (2020) obtuvieron $Rr = 0,08-0,15$ y $Rh = 0,012-0,025$, reflejando la alta energía de relieve disponible en ambientes montañosos. Casermeiro *et al.* (2004), en su estudio de cuencas de la Depresión del Salado bonaerense, reportaron valores de relieve relativo comparables a los obtenidos en la cuenca A1 ($Rr =$

0,003-0,006), confirmando la escasa diferenciación topográfica, característica de las llanuras pampeanas. Esta condición implica limitada energía potencial para procesos erosivos intensos, aunque favorece la acumulación de agua en depresiones topográficas y dificulta el drenaje natural durante períodos húmedos (Hurtado *et al.*, 2006; Taboada & Lavado, 2009).

3.3.7 Heterogeneidad morfométrica a escala de subcuenca

El análisis morfométrico reveló una marcada heterogeneidad entre las cinco subcuencas que conforman la cuenca A1, con implicaciones directas sobre su fragilidad hidrológico-ambiental. Esta variabilidad espacial, evidenciada por factores de forma que oscilan entre 0,12 y 0,54, densidades de drenaje entre 0,01 y 0,06 km/km², y pendientes medias entre 0,90% y 1,18%, es coherente con los patrones de variabilidad morfométrica reportados en otros sistemas de llanura. Brendel *et al.* (2017) identificaron heterogeneidades similares en cuencas del oeste bonaerense, donde diferencias relativamente pequeñas en pendiente (0,5-2,0%) generan comportamientos hidrológicos significativamente distintos en términos de tiempos de respuesta y susceptibilidad a anegamientos.

La subcuenca 3, identificada como de alta prioridad (PCM = 1,57), presenta características morfométricas que la diferencian del resto del sistema: forma compacta (Ff = 0,54, Re = 0,83), mayor densidad de drenaje relativa (Dd = 0,06 km/km²) y pendiente media superior (PM = 1,09%). Esta configuración favorece una respuesta hidrológica más rápida y concentrada que el resto de las subcuencas, incrementando su fragilidad ante eventos de precipitación intensa. Singh *et al.* (2021) reportaron patrones similares de jerarquización en la cuenca de Dudhnai, donde subcuencas compactas con mayor densidad de drenaje presentaron mayor susceptibilidad a erosión y generación de escorrentía concentrada. Sin embargo, es importante destacar que incluso esta subcuenca "crítica" de la cuenca A1 mantiene características propias de ambientes de llanura, con densidades de drenaje y pendientes significativamente inferiores a las consideradas críticas en ambientes serranos (Abdeta *et al.*, 2020; Jothimani *et al.*, 2020).

Por ello, es importante la aplicación de la metodología de priorización multicriterio, la cual permitió identificar que el 3,37% de la superficie de la cuenca A1 presenta alta fragilidad morfométrica, el 54% fragilidad media y el 42,63% baja fragilidad. Estudios morfométricos en cuencas de llanura pampeana (por ejemplo, Calvi *et al.*, 2016; Camino *et al.*, 2018) también muestran una predominancia de parámetros compatibles con baja y media fragilidad, coincidiendo con la menor vulnerabilidad morfométrica general de los sistemas de llanura.

La priorización morfométrica en ambientes de llanura requiere consideraciones particulares que difieren de las aplicadas en cuencas montañosas. Mientras en sistemas serranos los parámetros de relieve y torrencialidad son determinantes para establecer prioridades de intervención (Khurana *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2021), en ambientes de llanura cobran mayor relevancia parámetros relacionados con la forma de la cuenca, la capacidad de infiltración y la susceptibilidad a anegamientos prolongados. Forte Lay *et al.* (2008) señalan que, en la cuenca del río Salado bonaerense, las áreas de mayor fragilidad no necesariamente coinciden con las de mayor erosión potencial, sino con aquellas que presentan dificultades de drenaje natural y mayor duración de períodos de anegamiento, aspecto que debe considerarse en la planificación de estrategias de manejo y ordenamiento territorial.

3.4 Conclusiones

La caracterización morfométrica integral de la cuenca A1 del río Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina, permitió establecer su fragilidad morfométrica y jerarquizar sus subcuencas según su susceptibilidad a procesos de degradación. La metodología empleada, basada en el análisis integrado de parámetros de forma, relieve y drenaje mediante técnicas de detección remota y sistemas de información geográfica, demostró ser efectiva para la caracterización de ambientes de llanura donde las diferencias topográficas son sutiles y la red de drenaje presenta características particulares.

La cuenca A1 presenta características morfométricas distintivas de sistemas hidrológicos de llanura, con una superficie de 17.737,63 km² y un patrón de drenaje dendrítico de orden 3. Los parámetros de forma evidencian una morfología extremadamente alargada ($F_f = 0,17$; $K_c = 3,97$), favorable para la atenuación de crecidas al reducir la coincidencia temporal de aportes hídricos de diferentes sectores, que contribuyen a la vulnerabilidad a anegamientos por saturación durante eventos de precipitación prolongados. Los parámetros de relieve confirman condiciones típicas de ambientes de llanura, con pendiente media de 0,90%, relieve relativo de 0,004 y coeficiente de rugosidad de 0,0027, valores que indican escasa energía disponible para procesos erosivos intensos pero que favorecen la acumulación temporal de agua en sectores topográficamente deprimidos.

La densidad de drenaje extremadamente baja (0,03 km/km²), la elevada constante de mantenimiento del canal (30,33 km²/km) y la textura de drenaje muy gruesa (0,00004 km·#cauce/km²) confirman un sistema hidrológico con predominancia de procesos de infiltración sobre escorrentía superficial concentrada, característico de regiones con materiales permeables y relieves suaves. La baja torrencialidad ($C_t = 0,0033$) y frecuencia de cauces reducida ($F_s = 0,0013$) indican limitada capacidad de generación de flujos concentrados intensos, aunque la longitud del flujo terrestre elevada (15,17 km) favorece tiempos de residencia prolongados que pueden resultar en acumulación de agua durante períodos húmedos.

El análisis morfométrico a escala de subcuenca reveló una marcada heterogeneidad que condiciona respuestas hidrológicas diferenciadas. Las cinco subcuencas presentan variabilidad en factores de forma (F_f : 0,12-0,54), densidades de drenaje (0,01-0,06 km/km²) y pendientes medias (0,90-1,18%), reflejando diferencias geomorfológicas dentro de un sistema predominantemente de llanura. Los perfiles longitudinales corroboran estas características, mostrando gradientes suaves sostenidos en subcuencas alargadas (1 y 4) y configuraciones más uniformes en subcuencas compactas (3 y 5), confirmando la relación entre morfología y respuesta hidrológica.

La metodología de priorización multicriterio permitió jerarquizar las subcuencas según su fragilidad morfométrica, estableciendo que el 3,37% de la superficie presenta alta prioridad, el 54% prioridad media y el 42,63% baja prioridad. La subcuenca 3, identificada como de alta prioridad ($PCM = 1,57$), presenta forma compacta, mayor densidad de drenaje relativa y pendiente media superior, configuración que favorece concentración rápida de escorrentía y mayor susceptibilidad a procesos degradativos. Las subcuencas 2 y 5, clasificadas como de prioridad media, apuntan a una búsqueda de estrategias preventivas de manejo y monitoreo continuo para evitar degradación progresiva. Las subcuencas 1 y 4, de baja prioridad, presentan configuraciones morfométricas favorables para la estabilidad hidrológico-ambiental, aunque demandan prácticas sustentables que preserven estas condiciones a largo plazo.

La detección remota y las herramientas SIG de acceso libre facilitaron la cuantificación precisa de parámetros morfométricos en un ambiente donde las diferencias topográficas son mínimas. La

corrección manual de la red de drenaje mediante análisis de series temporales de imágenes satelitales Sentinel 2 y verificación de campo resultó fundamental para ajustar la configuración de cauces temporales y áreas de acumulación preferencial, superando las limitaciones de la extracción automática en ambientes de llanura. Esta metodología puede replicarse en otras cuencas de características similares donde el drenaje natural es poco desarrollado y la topografía extremadamente suave dificulta la delimitación automática.

La generación de esta información geoespacial de la distribución morfométrica y los estados de fragilidad en la cuenca A1, aportan un mayor entendimiento para el desarrollo de estrategias de ordenamiento territorial y gestión integrada de recursos hídricos adaptadas a las condiciones específicas de sistemas de llanura. Los resultados permitieron identificar tanto las fortalezas del sistema (morfología favorable para atenuación de crecidas, baja torrencialidad, escasa energía erosiva) como sus vulnerabilidades particulares (susceptibilidad a anegamientos, drenaje lento, tiempos de respuesta prolongados), orientando la implementación de medidas de manejo diferenciadas según las características morfométricas de cada subcuenca.

Las implicaciones para la gestión territorial son directas y específicas. En ambientes de llanura como la cuenca A1, las estrategias de manejo deben priorizar el control de excesos hídricos, la regulación de anegamientos y la conservación de la capacidad de infiltración del suelo, difiriendo sustancialmente de las intervenciones aplicadas en cuencas serranas donde predominan el control de erosión y la estabilización de laderas. La subcuenca 3 requeriría la implementación de medidas estructurales y no estructurales que mitiguen su fragilidad, incluyendo sistemas de monitoreo hidrológico, obras de conservación de suelos y regulación de actividades antrópicas. Las subcuencas de prioridad media requieren enfoques preventivos combinando prácticas agrícolas conservacionistas con monitoreo periódico que permita detectar tempranamente señales de deterioro. Las subcuencas de baja prioridad, especialmente la subcuenca 1 por su extensión territorial, revisten importancia estratégica para mantener la estabilidad general del sistema hidrológico mediante políticas de manejo sustentable que eviten intensificación agrícola sin medidas conservacionistas.

La caracterización morfométrica desarrollada constituye información base para evaluaciones hidrológicas más detalladas que integren modelación de escorrentía, análisis de conectividad hidrológica y evaluación de servicios ecosistémicos, permitiendo diseñar estrategias de adaptación ante la variabilidad climática y escenarios de cambio de uso del suelo. La metodología aplicada puede extenderse a otras cuencas de llanura de la región pampeana, contribuyendo al desarrollo de conocimiento sobre la fragilidad morfométrica de estos sistemas hidrológicos y facilitando la planificación territorial basada en evidencia científica.

Este estudio contribuye al objetivo general de la tesis doctoral orientada al análisis de la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de excesos hídricos superficiales, proporcionando la caracterización morfométrica de base necesaria para comprender los factores físicos que condicionan la respuesta hidrológica de la cuenca A1. Los resultados obtenidos constituyen un insumo fundamental para la modelación hidrológica de eventos extremos y el diseño de políticas de ordenamiento territorial y la implementación de programas de conservación de suelos y recursos hídricos adaptados a las condiciones específicas de cada unidad hidrológica, contribuyendo al desarrollo sustentable de la región y al manejo integral de los recursos naturales en ambientes de llanura.

3.5 Bibliografía

- Abdeta, G. C., Tesemma, A. B., Tura, A. L., & Atlabachew, G. H. (2020). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and practices in Gidabo Basin, Southern Rift Valley of Ethiopia. *Applied Water Science*, 10, Artículo 158. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01239-7>
- Agarwal, C. S. (1998). Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district, U.P. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(4), 169–175. <https://doi.org/10.1007/BF02990795>
- Altaf, F., Meraj, G., & Romshoo, S. A. (2013). Morphometric analysis to infer hydrological behaviour of Lidder watershed, Western Himalaya, India. *Geography Journal*, 2013, Artículo 178021. <https://doi.org/10.1155/2013/178021>
- Arulbalaji, P., & Padmalal, D. (2020). Sub-watershed prioritization based on drainage morphometric analysis: A case study of Cauvery River Basin in South India. *Journal of the Geological Society of India*, 95(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1383-6>
- Baldini, C., Marasas, M., & Drozd, A. A. (2019). Entre la expansión urbana y la producción de alimentos: El conflicto rural/urbano en relación al patrón espacial de usos del suelo en el partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)*, 118(2), 1–18.
- Biswas, S., Sudhakar, S., & Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155–166. <https://doi.org/10.1007/BF02991569>
- Brendel, A. S., Bohn, V. Y., & Piccolo, M. C. (2017). Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 78(282), 7–29. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201701>
- Calvi, C., Dapeña, C., Massone, H., & Martínez, D. (2016). Características morfométricas y morfodinámicas de una cuenca hidrográfica de llanura. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 37, 29–36. <https://doi.org/10.59069/676pm862>
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., López de Armentia, A., Del Río, J. L., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73–97. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383257036005>
- Casermeiro, M. A., Molina, J. A., de la Cruz Caravaca, M. T., Hernando Costa, J., & Moreno, P. S. (2004). Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena*, 57(1), 91–107. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00160-7)
- Cassettari, G. A., & de Queiroz, T. M. (2019). Morphometric characterization of the hydrographic basin of Jauquara River in the transition between the Cerrado and Amazon biomes in Mato Grosso-Brazil. *Floresta*, 49(2), 325–334. <https://doi.org/10.5380/rf.v49i2.58166>
- Chopra, R., Dhiman, R. D., & Sharma, P. K. (2005). Morphometric analysis of sub-watersheds in Gurdaspur district, Punjab using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33(4), 531–539. <https://doi.org/10.1007/BF02990738>
- Chowdary, V. M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Krishna Murthy, Y. V. N., Sharma, J. R., & Dadhwal, V. K. (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic

hierarchy process technique and GIS. *Water Resources Management*, 27(10), 3555–3571.

<https://doi.org/10.1007/s11269-013-0364-6>

Clarke, J. I. (1966). Morphometry from maps. En G. H. Dury (Ed.), *Essays in geomorphology* (pp. 235–274). Heinemann.

Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 23(64), 26–34.

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2015643592>

Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. En C. Ferrer & M. Duarte (Eds.), *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas, bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocotíes*. FUNDAPRIS.

Demoulin, A. (1998). Testing the tectonic significance of some parameters of longitudinal river profiles: The case of the Ardenne (Belgium, NW Europe). *Geomorphology*, 24(2-3), 189–208.

[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00016-6)

Díaz Gómez, A. R., & Gaspari, F. J. (2018). Transformación territorial: Intensificación agraria y pérdida del suelo en la cuenca del río Marapa, Tucumán, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 116(2). <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/6171>

Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., & Al-Shaikh, N. (2015). Quantitative analysis of geomorphometric parameters of Wadi Kerak, Jordan, using remote sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(06), 456–475. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.76037>

Forte Lay, J. A., Scarpatti, O. E., & Capriolo, A. D. (2008). Precipitation variability and soil water content in Pampean flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*, 47(4), 341–354.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692008000400004

Gaspari, F. J., & Bruno, J. E. (2003). Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *Ecología Austral*, 13(1), 109–120.

https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1544

Gaspari, F. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (SIG)* [Tesis de maestría, Universidad Internacional de Andalucía].

<https://dspace.unia.es/handle/10334/59>

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (1a ed.). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>

Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & de Antueno, L. (2025). *Contribuciones al manejo integral de cuencas hidrográficas. Herramientas y procedimientos básicos a campo y en gabinete*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/184639>

García Martínez, B., Gil, V., Carbone, M. E., & Posada Simeón, C. (2016). Caracterización del patrón hidromorfológico del Arroyo de la Ventana en su tramo medio alto (Buenos Aires, Argentina).

Estudios Geográficos, 77(281), 521–541. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201617>

- Gavilán, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos de pluviómetros. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(1), 111–121. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77219>
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas*, (52), 215–225. <https://doi.org/10.14198/INGEO2010.52.08>
- Goldrick, G., & Bishop, P. (2007). Regional analysis of bedrock stream long profiles: Evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 649–671. <https://doi.org/10.1002/esp.1413>
- Gravelius, H. (1914). *Grundriss der gesamten Gewässerkunde. Band 1: Flusskunde*. Compendium of Hydrology.
- Guevara Ochoa, C., Vives, L., Zimmermann, E., Masson, I., Fajardo, L., & Scioli, C. (2019). Analysis and correction of digital elevation models for plain areas. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 85(3), 209–219. <https://doi.org/10.14358/PERS.85.3.209>
- Guzmán, A. C., de Antueno, L., & Gaspari, F. J. (2021). Análisis de la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)*, 120(1), Artículo e069. <https://doi.org/10.24215/16699513e069>
- Hack, J. T. (1957). *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland* (U.S. Geological Survey Professional Paper 294-B). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp294B>
- Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1(4), 421–429. <https://pubs.usgs.gov/publication/70161653>
- Hadley, R., & Schumm, S. A. (1961). *Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin* (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1531-B). U.S. Government Printing Office.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(4), 275–370.
- Hurtado, M. A., Giménez, J. E., Cabral, M. G., da Silva, M., Martínez, O., Camilión, M. C., Sánchez, C., Muntz, D., Gebhard, J., Forte, L., Boff, L., Crincoli, A., & Lucasoli, H. (2006). *Análisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial*. Consejo Federal de Inversiones & Universidad Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27046>
- Javed, A., Khanday, M. Y., & Rais, S. (2011). Watershed prioritization using morphometric and land use/land cover parameters: A remote sensing and GIS based approach. *Journal of the Geological Society of India*, 78(1), 63–75. <https://doi.org/10.1007/s12594-011-0068-6>
- Jothimani, M., Abebe, A., & Dawit, Z. (2020). Mapping of soil erosion-prone sub-watersheds through drainage morphometric analysis and weighted sum approach: A case study of the Kulfo River basin, Southern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2377–2389. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00820-y>
- Khurana, D., Rawat, S. S., Raina, G., Sharma, R., & Jose, P. G. (2020). GIS-based morphometric analysis and prioritization of Upper Ravi Catchment, Himachal Pradesh, India. En R. AlKhaddar, R. K. Singh, S.

Dutta, & M. Kumari (Eds.), *Advances in water resources engineering and management* (pp. 163–185). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2_13

Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.

Kruse, E., & Laurencena, P. (2005). Aguas superficiales: Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. En R. E. Barrio, R. O. Etcheverry, M. F. Caballé, & E. Llambías (Eds.), *Geología y recursos minerales de la provincia de Buenos Aires* (cap. 19, pp. 313–326). Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino.

Kuppel, S., Houspanossian, J., Noretto, M. D., & Jobbágy, E. G. (2015). What does it take to flood the Pampas? Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research*, 51(4), 2937–2950. <https://doi.org/10.1002/2015WR016966>

Langbein, W. B. (1947). *Topographic characteristics of drainage basins* (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 968-C). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/wsp968C>

Leopold, L. B., & Maddock, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* (U.S. Geological Survey Professional Paper 252). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp252>

López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería medioambiental*, TRAGSATEC. Ministerio de Medio Ambiente, Editorial Mundi Prensa.

López Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121-137. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1211>

Mesa, L. M. (2006). Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environmental Geology*, 50(8), 1235–1242. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0297-y>

Meshram, S. G., & Sharma, S. K. (2017). Prioritization of watershed through morphometric parameters: A PCA-based approach. *Applied Water Science*, 7(3), 1505–1519. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0332-9>

Michalijos, M. P., & Zapperi, P. A. (2015). Análisis morfométrico aplicado a la caracterización de redes fluviales para la gestión de peligro de incendios forestales. *Revista del Departamento de Geografía*, XIV, 53–70. <http://hdl.handle.net/11336/65070>

Miller, V. C. (1953). *A quantitative geomorphologic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee* (Technical Report No. 3, Project NR 389042, Contract N6 ONR 271-300). Columbia University, Department of Geology, Office of Naval Research, Geography Branch.

Nag, S. K., & Chakraborty, S. (2003). Influence of rock types and structures in the development of drainage network in hard rock area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 31(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/BF03030749>

Navarro, E. L., & Cano, D. M. (2017). Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes, mediante técnicas digitales. En *IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico (CONCYT)*. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6712>

- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., & Jackson, R. B. (2012). The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.008>
- Pakhmode, V., Kulkarni, H., & Deolankar, S. B. (2003). Hydrological-drainage analysis in watershed-programme planning: A case from the Deccan basalt, India. *Hydrogeology Journal*, 11(5), 595–604. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0279-z>
- Pandey, A., Chowdary, V. M., & Mal, B. C. (2004). Identification of critical erosion-prone areas in a small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*, 21(4), 729–746. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9061-z>
- Patel, D. P., Dholakia, M. B., Naresh, N., & Srivastava, P. K. (2012). Water harvesting structure positioning using geo-visualization concept and prioritization of mini-watersheds through morphometric analysis in the Lower Tapi Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40(2), 299–312. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0147-6>
- Pereyra, F. X. (2018). *Regiones geomorfológicas de Argentina*. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT). <https://undavdigital.undav.edu.ar/xmlui/handle/20.500.13069/1162>
- Puno, R. C. C., & Puno, G. R. (2019). Watershed conservation prioritization using geomorphometric and land use–land cover parameters. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(3), 279–294. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.03.02>
- Rai, P. K., Mohan, K., Mishra, S., Ahmad, A., & Mishra, V. N. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 7(1), 217–232. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0238-y>
- Rastogi, R. A., & Sharma, T. C. (1976). Quantitative analysis of drainage basin characteristics. *Journal of Soil and Water Conservation in India*, 26(1–4), 18–25.
- Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Massone, H. E., Martínez, D. E., & Bocanegra, E. (2010). El agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del sudeste bonaerense, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 373–386. https://web.igme.es/Boletin/2010/121_4/6-ARTICULO%203.pdf
- Romshoo, S. A., Bhat, S. A., & Rashid, I. (2012). Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. *Journal of Earth System Science*, 121(3), 659–686. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0192-8>
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597–646.
- Schumm, S. A. (1963). *A tentative classification of alluvial river channels: An examination of similarities and differences among some Great Plains rivers* (Circular 477). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir477>
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. John Wiley & Sons.
- Schumm, S. A. (1993). River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. *The Journal of Geology*, 101(2), 279–294. <https://doi.org/10.1086/648221>

Schwanghart, W., & Scherler, D. (2014). TopoToolbox 2: MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 1–7.

<https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>

Singh, W. R., Barman, S., & Tirkey, G. (2021). Morphometric analysis and watershed prioritization in relation to soil erosion in the Dudhnai Watershed. *Applied Water Science*, 11, Artículo 151.

<https://doi.org/10.1007/s13201-021-01483-5>

Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655–668. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology* (pp. 439-476). McGraw Hill.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1451624>

Taboada, M. A., & Lavado, R. S. (Eds.). (2009). *Alteraciones de la fertilidad de los suelos: El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/libros/L9789502911625.pdf>

Venkatesh, M., & Anshumali. (2019). A GIS-based assessment of recent changes in drainage and morphometry of Betwa River basin and sub-basins, Central India. *Applied Water Science*, 9, Artículo 157. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1033-6>

Verstappen, H. T. (1983). *Applied geomorphology: Geomorphological surveys for environmental development*. Elsevier Scientific Publishing Company.

<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2029731>

Zavoianu, I. (1985). *Morphometry of drainage basins*. Elsevier.

https://www.researchgate.net/publication/38982899_Morphometry_of_Drainage_Basins

4 CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA - AMBIENTAL

Una caracterización integral geográfica - ambiental es el estudio detallado de las características ambientales, hidrológicas, de suelo, y otros componentes del entorno natural y antrópico, para entender cómo interactúan con las actividades humanas y el medio ambiente en general. Se utiliza para evaluar riesgos, planificar el uso del territorio y tomar decisiones informadas sobre la protección y conservación del ambiente. La incorporación de una caracterización poblacional permite visualizar las características socioeconómicas en un momento determinado, la cual se realiza con el fin de comprender su estructura, tamaño, dinámicas y particularidades que incluyen por ejemplo el sistema vial. Esta caracterización integral consiste en un análisis de índole esencialmente descriptivo, que puede realizarse desde distintos enfoques metodológicos, haciendo uso de fuentes primarias y secundarias de información, con el propósito de aproximarse al conocimiento y comprensión del área en estudio.

La cuenca A1 se encuentra en la Pampa húmeda bonaerense (Figura 4.1). Es una región de llanuras, de relieve muy suave, con una pendiente que decrece en altura con dirección oeste-este. Las aguas de los ríos y arroyos de cauce permanente escurren lentamente en direcciones variables hacia lagunas, bañados o sectores con menor nivel. Predominan los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) sobre el escurrimiento superficial, razón por la cual las inundaciones son frecuentes. El paisaje en esta zona es producto de la acción de agregación fluvial, modificada parcialmente por la acción del litoral y los vientos. Los suelos presentan un importante grado de desarrollo producto de la baja morfogénesis. Se presentan amplias terrazas fluviales y planicies aluviales surcadas por numerosos cursos de agua y frecuentes bajos y lagunas de poca profundidad. Es importante mencionar que la buena capacidad productiva de los suelos permitió que los pastizales pampeanos se sustituyeran por agroecosistemas, evidenciando un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación. La actividad productiva es predominantemente agropecuaria, siendo el suelo y el agua los recursos naturales directamente vinculados con esta producción, que resultaron más afectados en el espacio y en el tiempo.

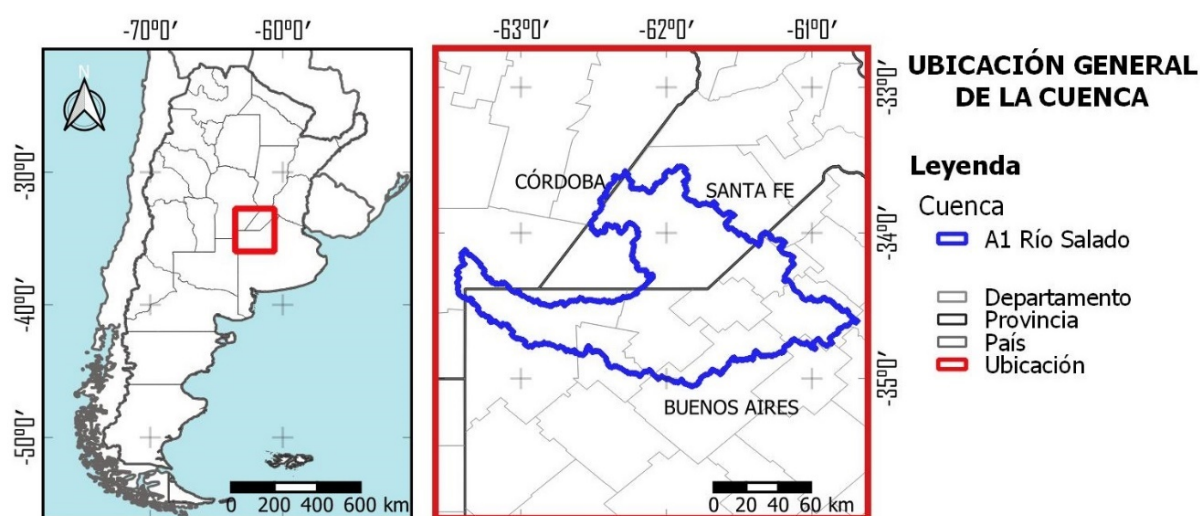


Figura 4.1. Ubicación de la cuenca A1. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

Por medio de un procesamiento geoespacial con sistemas de información geográfica (SIG) con el programa QGis, con información disponible en el portal geográfico del Instituto Geográfico Nacional (IGN, s.f.), y la cartografía lograda en capítulos anteriores, se trabajó a nivel de A1 y sus subcuencas que en estudio. A continuación, se presenta cada una de las temáticas analizadas para la caracterización geográfica y ambiental.

4.1 Distribución político - administrativa

El detalle del presente trabajo de tesis permitió definir la superficie de aporte de la cuenca A1, subcuenca del Río Salado, como área de estudio, la cual cuenta con una superficie de 17.737,63 km². La misma se subdividió en subcuencas, las cuales conformaron el modelo de cuantificación de la susceptibilidad de la inundación y se caracterizaron geográficamente. El procesamiento geoespacial con SIG de la información topográfica y de elevación, explicada en el capítulo de modelos digitales de elevación, contribuyó a definir 5 subcuencas, que se denominan numéricamente en forma progresiva desde las nacientes hacia su desembocadura, como se representa en la Figura 3.1.

La cuenca A1 ocupa 11.945,51 km² (67,35% del total) en la provincia de Buenos Aires, 5.220,52 km² (29,43% del total) en la provincia de Santa Fe y 571,6 km² (3,22% del total) en la provincia de Córdoba. Las subcuencas 1, 2 y 3 se encuentran en las tres provincias y las subcuencas 4 y 5 ocupan territorio bonaerense. Las subcuencas 1 y 2 ocupan la mayor superficie, con 7.582,47 km² y 6.764,17 km², seguidas de la subcuenca 4 con 1.995,20 km². Las cuencas 5 y 3 son las más pequeñas, con una superficie de 798,01 km² y 597,78 km² cada una (Figura 4.2).

La cuenca A1 se distribuye geopolíticamente en los partidos de General López en la provincia de Santa Fe, los partidos de Florentino Ameghino, General Villegas, General Pinto, Leandro N. Alem, General Arenales, Junín, Chacabuco, Lincoln, General Viamonte y Colón en la provincia de Buenos Aires y en la provincia de Córdoba los partidos de Presidente Roque Sáenz Peña y Marcos Juárez (Figura 4.2). La Tabla 4.1 presenta la superficie de cada uno de los partidos en las subcuencas.

Tabla 4.1. Superficie de ocupación de los departamentos provinciales en las subcuencas.

	Superficie por Provincia (km ²)				%
	Buenos Aires	Córdoba	Santa Fe	Total general	Superficie
Subcuenca 1	7.088,53	483,3	10,64	7.582,47	42,75%
Florentino Ameghino	906,11			906,11	5,11%
General Arenales	95,45			95,45	0,54%
General López			10,64	10,64	0,06%
General Pinto	2.199,89			2.199,89	12,40%
General Villegas	2.496,79			2.496,79	14,08%
Junín	15,19			15,19	0,09%
Leandro N. Alem	1.122,48			1.122,48	6,33%
Lincoln	252,62			252,62	1,42%
Presidente Roque Sáenz Peña		483,3		483,3	2,72%
Subcuenca 2	1.465,99	88,3	5.209,88	6.764,17	38,13%
Colón	57,14			57,14	0,32%
General Arenales	887,77			887,77	5,01%
General López			5.209,88	5.209,88	29,37%
General Pinto	206,47			206,47	1,16%
Junín	0,8			0,8	0,00%
Leandro N. Alem	313,81			313,81	1,77%
Marcos Juárez		88,3		88,3	0,50%
Subcuenca 3	597,78			597,78	3,37%
General Arenales	152,84			152,84	0,86%
Junín	444,94			444,94	2,51%
Subcuenca 4	1.995,2			1.995,2	11,25%
General Pinto	97,19			97,19	0,55%
Junín	334,51			334,51	1,89%
Leandro N. Alem	167,88			167,88	0,95%
Lincoln	1.395,62			1.395,62	7,87%
Subcuenca 5	798,01			798,01	4,50%
Chacabuco	5,84			5,84	0,03%
General Viamonte	55,59			55,59	0,31%
Junín	736,58			736,58	4,15%
Total general	11.945,51	571,6	5.220,52	17.737,63	100,00%
% Superficie	67,35%	3,22%	29,43%	100,00%	

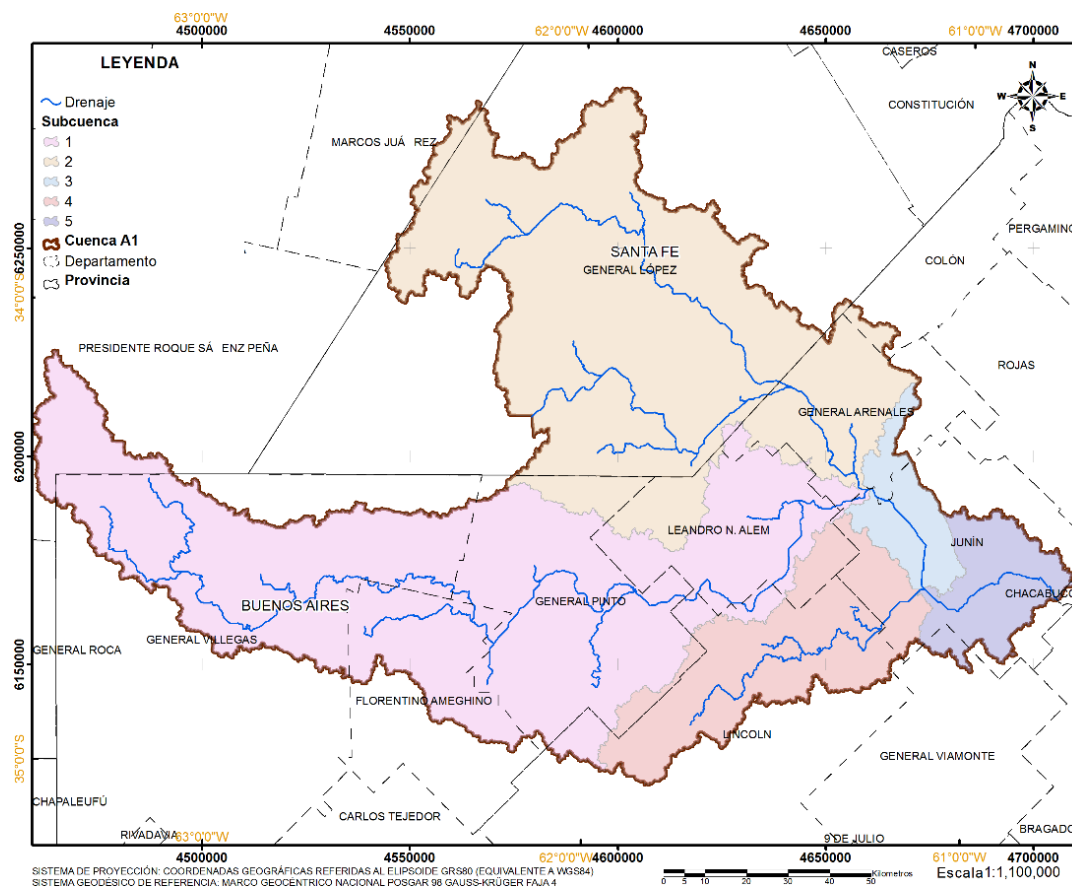


Figura 4.2 Distribución de los departamentos en las subcuencas. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).

4.2 Centros poblados

Los principales centros poblados se exhiben en la Figura 4.3. y se detallan las cabeceras de partido, los asentamientos de menor envergadura y la población estimada de acuerdo con el Censo Nacional de Población del Instituto Nacional de Estadística y Censo de la República Argentina (INDEC, 2024).

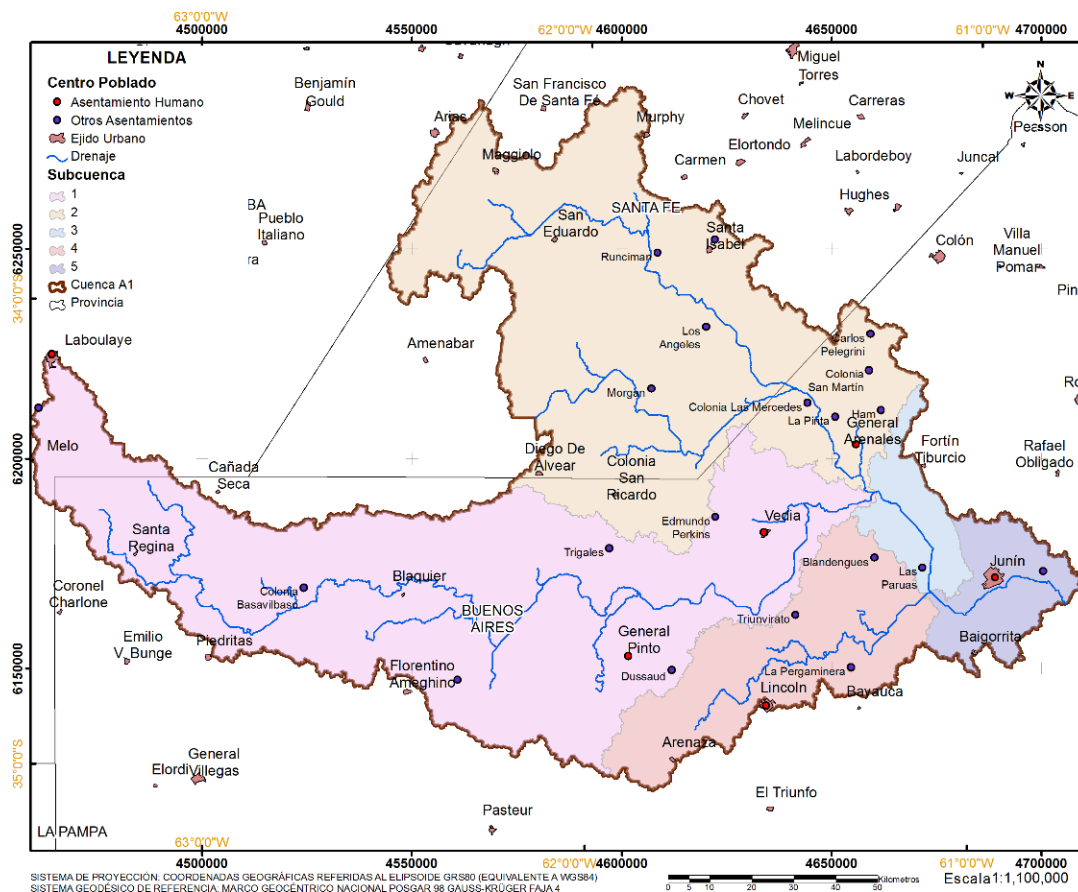


Figura 4.3 Distribución de los centros poblados en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de IGN (s.f).

En la Figura 4.4 se presentan los datos de la distribución de la población por departamento completo correspondientes al Censo Nacional de Población 2022 con resultados definitivos, los cuales indican que la provincia de Buenos Aires tiene 176.438 habitantes, Santa Fe 107.741 habitantes y Córdoba 22.796 habitantes. Las ciudades con más de 5.000 habitantes en la A1 son: Junín (95.385 hab), Venado Tuerto (82.757 hab), Lincoln (32.773 hab), Laboulaye (22.523 hab), Vedia (9.595 hab), General Pinto (8.002 hab).

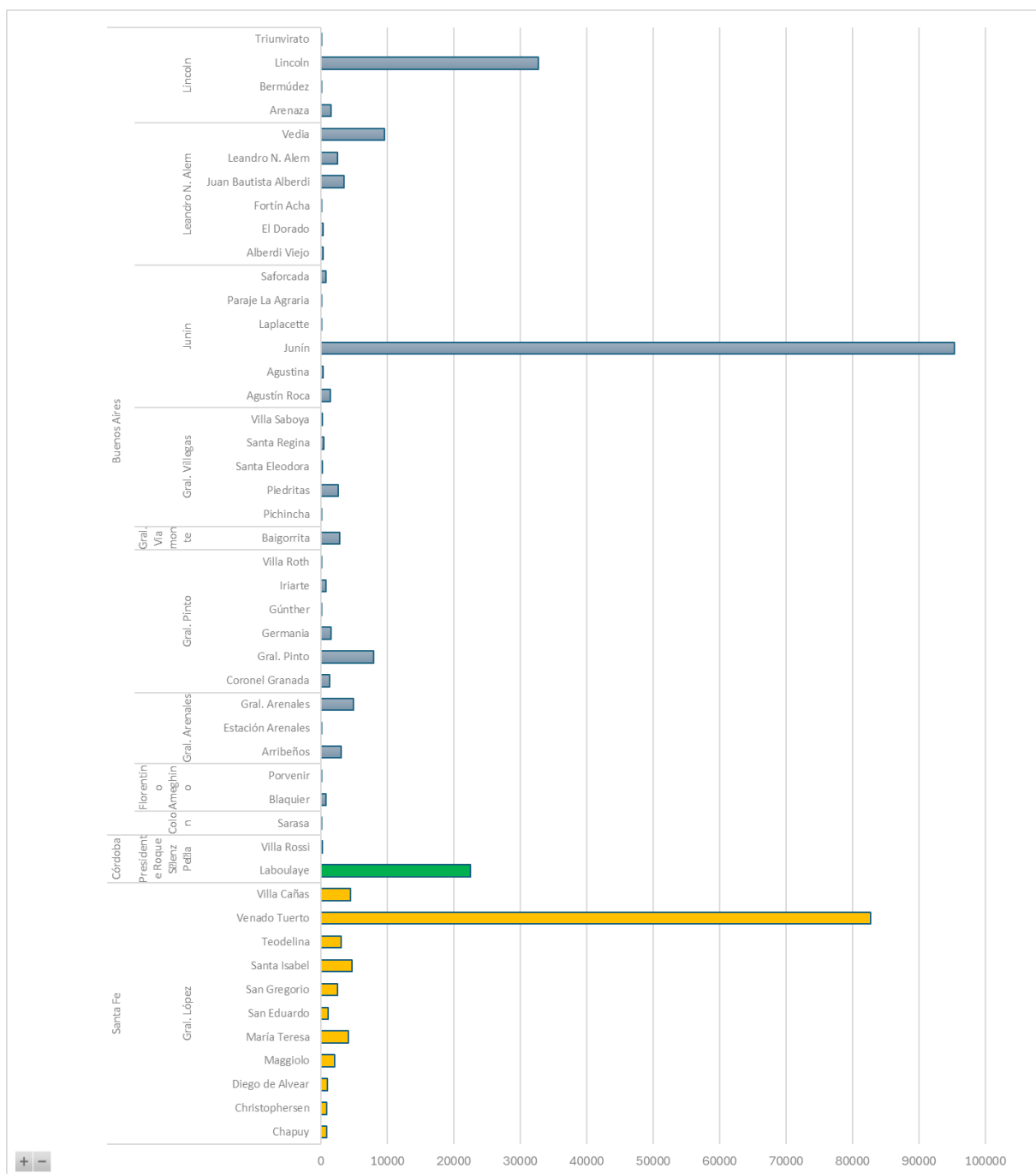


Figura 4.4 Población por provincia, departamento y localidad en la cuenca A1.

Ref: color gris: provincia de Buenos Aires; verde: Córdoba; amarillo: Santa Fe.

4.3 Sistema vial y de transporte

La infraestructura vial de la zona está representada por cuatro rutas nacionales que atraviesan la cuenca de Norte a Sur y de Este a Oeste, tres (cuatro) rutas provinciales con igual recorrido y varios caminos vecinales (Figura 4.5) (IGN, s.f.).

Las rutas nacionales que atraviesan la cuenca A1 son las Rutas Nacionales Nº 7, 8, 188 y 33.

- La Ruta Nacional 7 une las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, San Luis y Mendoza. Forma parte del más importante corredor bioceánico del país y es un ramal de la carretera panamericana, que continúa en territorio chileno. Atraviesa el territorio argentino de este a oeste, lo que implica que sea una carretera de alto tránsito de automóviles y camiones.
- La Ruta Nacional 8 une las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y San Luis. Esta ruta se formó con parte de la traza de la Ruta Nacional 9, la Ruta Nacional 186, y la Ruta Nacional 160. Se pavimentó en 1940, siendo la vía obligada para acceder a las ciudades de San Luis y Mendoza. Esto cambió a mediados de la década de 1970 cuando se terminó el pavimento de la Ruta Nacional 7 que, pasó a ser la principal vía entre Buenos Aires y Santiago de Chile,
- La Ruta Nacional 188 tiene su km 0 en el Puerto de San Nicolás de los Arroyos, provincia de Buenos Aires y finaliza en la ciudad de General Alvear, provincia de Mendoza. El trazado es de noreste a sudoeste entre San Nicolás de los Arroyos y Lincoln y luego de este a oeste.
- La ruta Nacional 33 une la Ruta Nacional 3 en la ciudad de Bahía Blanca (Buenos Aires) y la Avenida de Circunvalación de Rosario (Santa Fe). Esta carretera une ciudades de gran producción industrial y agrícola-ganadera con dos de los puertos más importantes del país, lo que genera gran cantidad de vehículos pesados en la ruta.

La región es atravesada en dirección SE - NO por la Ruta Provincial Nº 65 en la Provincia de Buenos Aires que se continúa en la Ruta Provincial Nº 94 en la Provincia de Santa Fe. Se observan además la Ruta Provincial Nº 14, que corre con dirección SO – NE en Santa Fe y la R. P Nº 50 en la provincia de Buenos Aires (S-NE).

4.4 Descripción climática

El clima regional presenta un amplio rango de variación, que depende de los regímenes de radiación solar, la circulación de los componentes atmosféricos, la rotación de la humedad, las particularidades físico-geográficas (relieve) y la influencia humana en las condiciones climáticas.

Según el sistema de clasificación climática de Köppen–Geiger, la región en estudio se encuadra dentro del tipo Cfa, correspondiente a un clima templado húmedo sin estación seca. Este tipo climático se caracteriza por temperaturas medias del mes más frío comprendidas entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, veranos cálidos con temperaturas medias superiores a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un régimen de precipitaciones distribuido de manera relativamente homogénea a lo largo del año, sin un período seco definido (Peel *et al.*, 2007). Estas condiciones son representativas del norte de la llanura pampeana y ejercen una influencia directa sobre la dinámica hidrológica, el desarrollo de los suelos y las aptitudes productivas.

Los datos climáticos de la zona de estudio se obtuvieron del Atlas Climático Digital de la República Argentina ¹¹ (Bianchi & Cravero, 2010), desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en el marco del Programa Nacional Ecorregiones. A partir del procesamiento de dicha información, se caracterizó la precipitación media anual (Figura 4.6), donde surge que al oeste alcanza valores de 902 mm, aumentando con dirección sudeste, hacia la desembocadura de la cuenca, donde se observa la isohieta de 1020 mm.

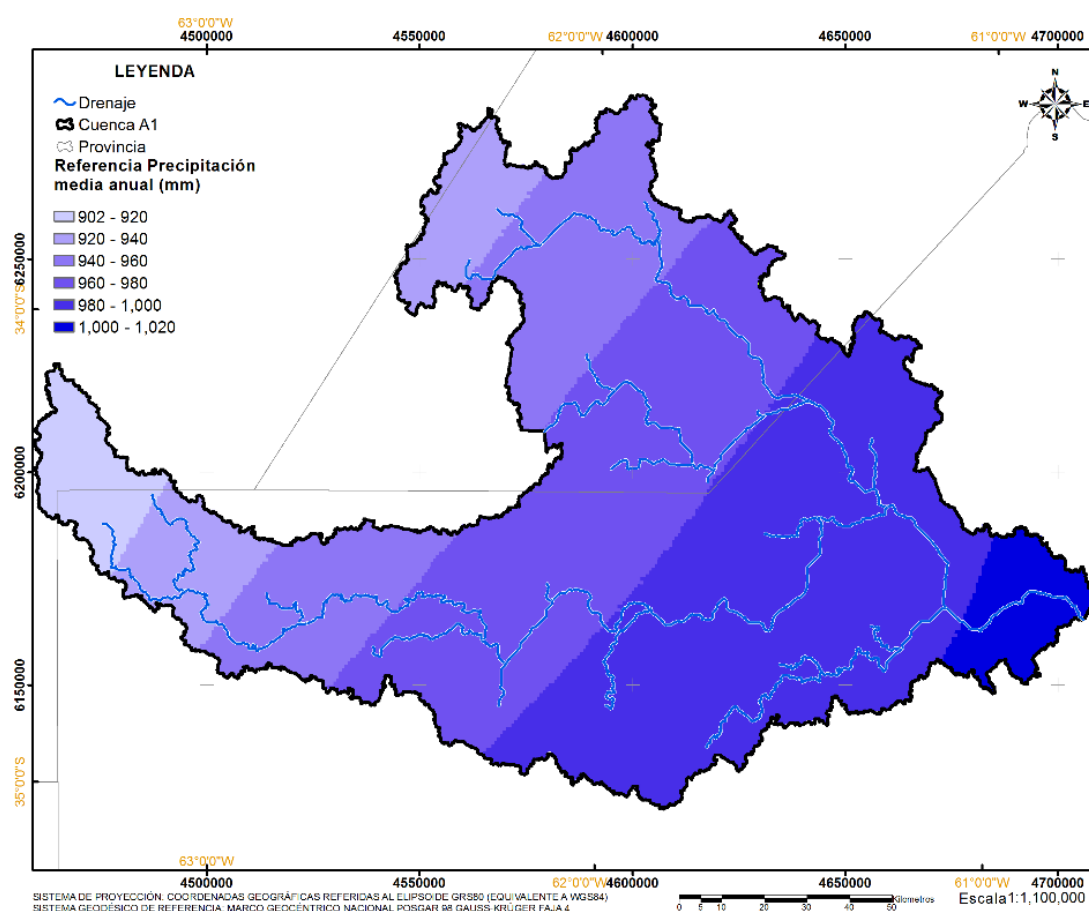


Figura 4.6 Distribución de la precipitación media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).

¹¹ <http://geosalta.inta.gov.ar/geoserver/wcs> <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/16040>

La zonificación de la temperatura media anual se visualiza en la Figura 4.7, donde las isotermas expresan valores de 17,5 °C se desarrollan al norte de la cuenca A1, descendiendo con dirección sur, hasta registrarse la isoterma entre 15,8 – 16 °C.

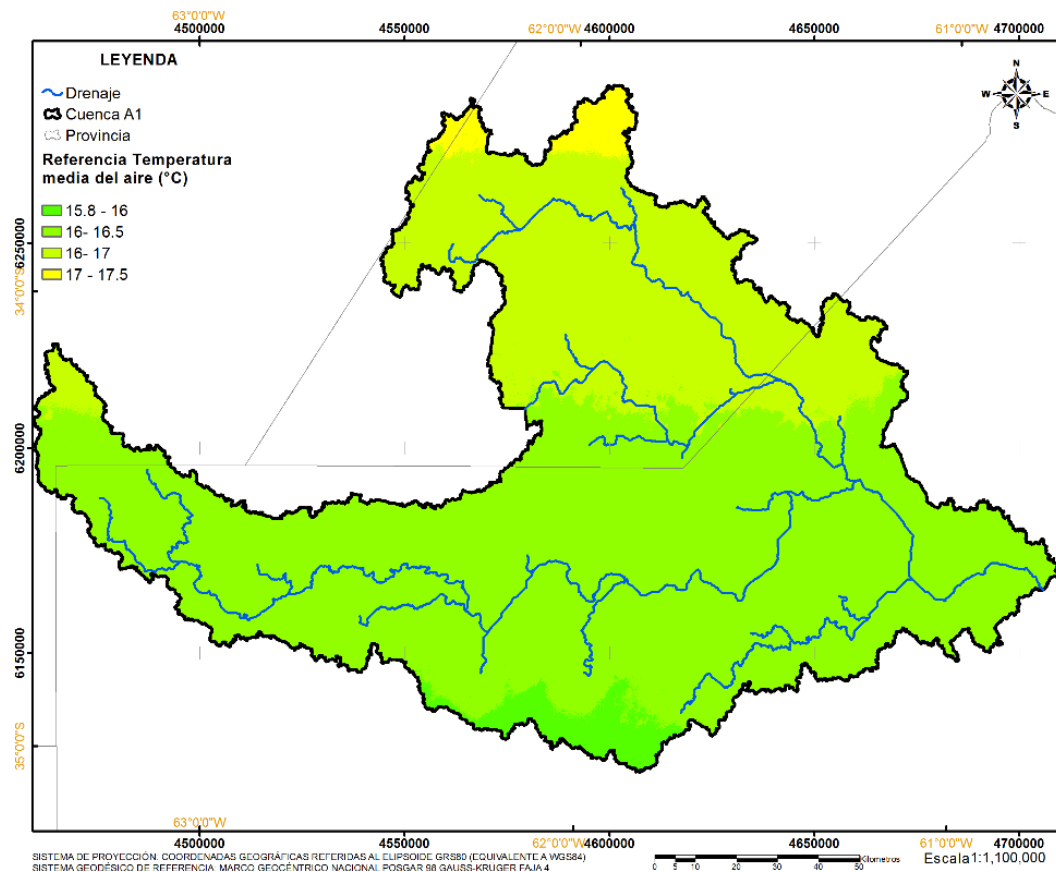


Figura 4.7 Distribución de la temperatura media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).

En la Figura 4.8 se representa la evapotranspiración potencial media anual en la cuenca A1, donde se destacan valores mayores al norte de la cuenca (870 – 880 mm), disminuyendo hacia el sur, donde se observan registros de 780 – 790 mm.

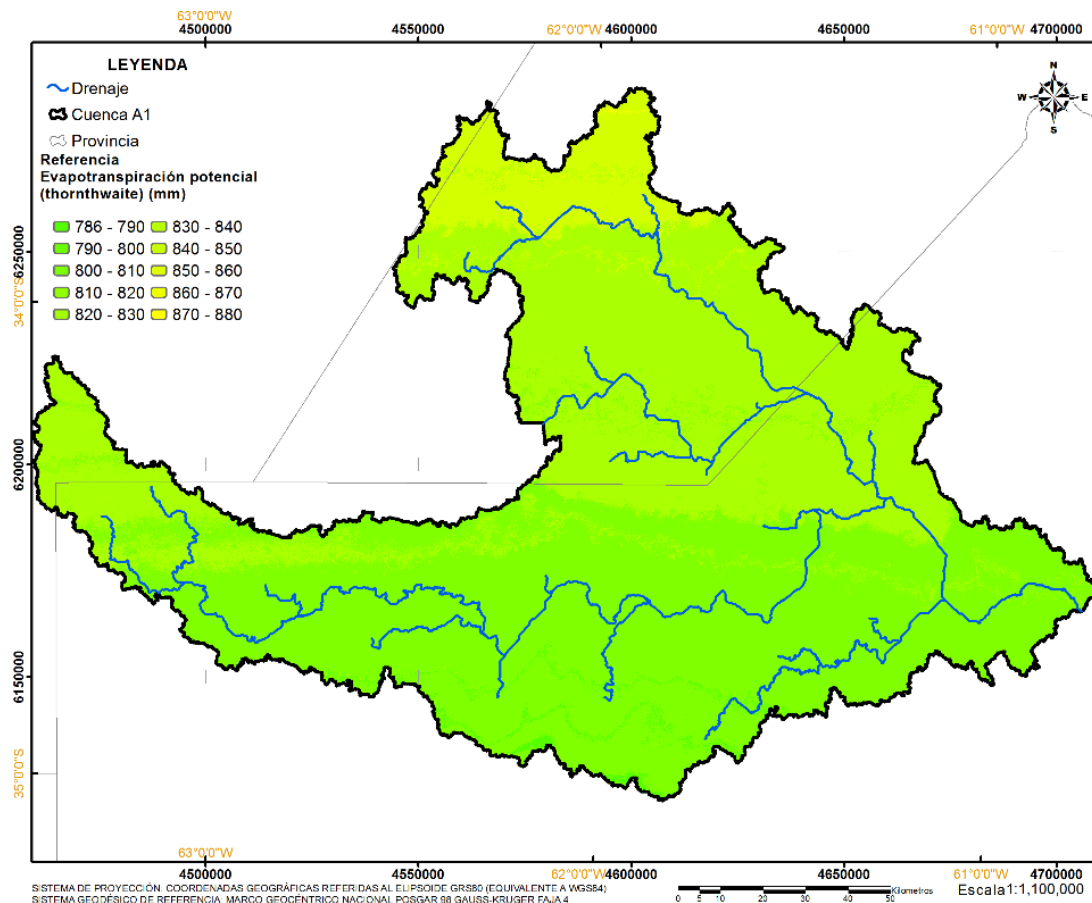


Figura 4.8 Distribución de la evapotranspiración potencial media anual. Fuente: Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).

En resumen, el clima general indica que la A1 presenta veranos cálidos, con temperaturas máximas que suelen oscilar entre los 30 y 35°C, aunque pueden superar los 38°C en días de ola de calor. Los inviernos son frescos a fríos, con mínimas que pueden bajar a 0-5°C, y algunas heladas ocasionales. La precipitación se presenta con lluvias moderadas a abundantes, con un promedio anual entre 900-1100 mm. La mayor cantidad de precipitaciones se da en primavera y verano, a menudo en forma de tormentas intensas. En los meses de verano la evapotranspiración se registra en valores entre 102 mm de mínima a 150 mm de máxima, los que van disminuyendo hacia los meses de invierno con valores de mínima de 18 mm a valores de máxima de 29 mm.

4.5 Relación de la posición del suelo y cuerpos de agua en la zona de estudio

Fan *et al.* (2019) expresan que el análisis integral de la posición del terreno se orienta hacia la comprensión de su relación con el sistema hídrico superficial y la determinación de la ocupación espacial de cada elemento geomorfométrico dentro de una cuenca. Este enfoque permitió establecer una caracterización cuantitativa de la A1 y establecer cómo la configuración topográfica modula los procesos de redistribución del agua en el paisaje, reconociendo que la convergencia lateral del flujo desde divisorias hacia valles genera gradientes sistemáticos de humedad, resultando en zonas de valle más húmedas con niveles freáticos someros y zonas de divisoria más secas con niveles freáticos profundos o ausentes, a partir de la información lograda en los capítulos precedentes de esta tesis.

El concepto de posición del suelo evalúa indirectamente las características como la pendiente y la topografía general del suelo, que influyen directamente en la capacidad de uso y aptitud productiva de la tierra (SAGyP-INTA, 1989). Complementariamente, a este concepto, se visualizó la relación de la posición y la curvatura del terreno, detallando la influencia sobre los procesos de flujo superficial, y como afectan sobre patrones de convergencia y divergencia que controlan el movimiento del agua infiltrada a través de laderas, como describe Talebi (2008). La convergencia y divergencia topográfica constituyen controles de primer orden sobre la respuesta hidrológica de laderas y cuencas (Bogaart & Troch, 2006).

Al enfocarse el estudio en un tema hidrológico y su relación con el terreno, a nivel de la cuenca hidrográfica A1 definida en el Capítulo 2, el enfoque metodológico adoptado priorizó el análisis sistemático de variables de posición del suelo, reconociendo que atributos topográficos, tales como altitud, pendiente, orientación, curvatura del perfil, ejercen un impacto significativo en los procesos de escorrentía superficial y transporte, como expresa Hallema *et al.* (2016). Estos atributos topográficos no sólo controlan la generación y dirección del flujo superficial, sino que también determinan patrones espaciales de conectividad hidrológica a escala de ladera y cuenca (Bracken *et al.*, 2013).

Por ello, a partir de la definición de las unidades hidrológicas y su morfometría, se procesó y analizó información geoespacial con herramientas SIG del programa QGIS, para la caracterización del suelo en relación con la posición y su influencia sobre la dinámica hídrica superficial. Se contó con la base de datos de la cartografía digital del Atlas de Suelos del INTA a escala 1:500.000 (SAGyP-INTA, 1989; Cruzate *et al.*, 2013), basado en la clasificación de Soil Taxonomy (U.S. Department of Agriculture, 1999), la cual está disponible en el Geoportal web del INTA, para representar el sistema de drenaje superficial, zonificación de la posición del suelo y del tipo de drenaje, complementado con una caracterización morfométrica desarrollada.

Además, se utilizaron capas SIG del Instituto Geográfico Nacional (IGN, s.f.), correspondientes a la Base de Datos Geoespacial Institucional. Los datos se encuentran en formato vectorial, expresados en coordenadas geodésicas con Sistema de Referencia WGS 84 y Marco de Referencia POSGAR 07 (EPSG:4326)

A continuación, se presentan los resultados alcanzados para la caracterización de la relación de posición del terreno y el sistema de drenaje superficial.

4.5.1 Posición del suelo

La posición del suelo define como es la distribución de las elevaciones o irregularidades de una superficie considerada en su totalidad. Cada suelo por lo general está asociado a un cierto tipo o forma de paisaje y se vincula directamente a una forma de relieve, lo cual influye sobre su génesis. Integrando un modelo digital de elevación y la topografía de un sitio, se puede analizar las diferentes pendientes y posiciones y entender por ejemplo porque determinados sectores sufren encharcamiento u otros son propensos a erosión. Además, la posición del suelo en el paisaje determina las propiedades de los suelos y consecuentemente su comportamiento. Estos relieves pueden corresponderse a ambientes definidos que ocupan posiciones diversas en el paisaje, con características de suelos y vegetación particulares.

La zonificación de la posición del suelo en la cuenca A1 se obtuvo a partir del procesamiento del Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires, elaborado por SAGyP-INTA (1989), para lo cual se identificó su distribución espacial y el porcentaje de ocupación por cada categoría, presentado en la Figura 4.9 y Figura 4.10. La descripción general de dichas categorías se desarrolla a partir de una interpretación técnica consensuada, basada en su posición topográfica y geomorfológica, así como en los principales rasgos y el comportamiento hidropedológico de los suelos, y se detalla a continuación:

- Borde de cauces: Franja del terreno adyacente a los cauces, caracterizada por una elevada dinámica fluvial y sujeta a procesos periódicos de erosión y sedimentación. Los suelos se desarrollan sobre materiales aluviales recientes, con escaso grado de evolución pedogenética y alta variabilidad textural.
- Cubetas: Depresiones cerradas del relieve que concentran escurrimiento superficial y sedimentos. Presentan suelos generalmente profundos, con drenaje deficiente y frecuentes rasgos de hidromorfismo, asociados a anegamientos temporarios o estacionales.
- Ladera empinada: Sector del relieve con pendiente elevada, donde predominan procesos de escurrimiento rápido y erosión. Los suelos son someros a moderadamente profundos, con pérdida parcial del horizonte superficial y marcada influencia del material parental.
- Ladera media: Parte intermedia de la pendiente, con inclinación moderada y dinámica activa de transporte de materiales. Los suelos presentan profundidad y textura variables, condicionadas por procesos erosivos y redistribución de sedimentos.
- Laguna: Superficie ocupada por cuerpos de agua permanentes o semipermanentes. Predominan sedimentos finos y saturados, con escaso o nulo desarrollo de suelos bien diferenciados.
- Llanura: Superficie extensa y de relieve plano a suavemente ondulado. Los suelos se desarrollan sobre materiales relativamente homogéneos, con buen grado de evolución pedogenética, condicionados localmente por el drenaje y el nivel freático.
- Loma: Elevación positiva del relieve, de escala local, con pendiente suave a moderada hacia sus flancos. Los suelos suelen ser menos profundos en la parte superior y aumentar su espesor hacia las posiciones laterales.
- Pendiente: Superficie inclinada del terreno, sin especificación del grado de inclinación. Los suelos reflejan la influencia directa del gradiente topográfico sobre el escurrimiento superficial y la estabilidad del perfil.
- Loma plana: Loma cuya parte superior presenta una superficie relativamente plana. Los suelos en la cumbre muestran mayor continuidad y desarrollo que en lomas convexas, con menor concentración del escurrimiento superficial.
- Lomas altas: Conjunto de elevaciones que constituyen las posiciones topográficas más altas del paisaje local. Los suelos son generalmente someros en las crestas, con fuerte influencia de procesos erosivos y condiciones de mayor exposición.
- Planicie: Superficie amplia, continua y de escasa pendiente. Los suelos son profundos y relativamente uniformes, aunque pueden presentar variaciones locales asociadas al microrelieve y al régimen hídrico.

- Planicie anegable: Planicie sujeta a anegamientos temporarios o recurrentes como consecuencia de un drenaje deficiente o del aporte de escurrimientos. Los suelos presentan rasgos hidromórficos y condiciones de saturación periódica.
- Plano aluvial: Superficie formada por depósitos fluviales, asociada a cursos de agua actuales o recientes. Los suelos se desarrollan sobre materiales estratificados, con grado de evolución pedogenética variable.
- Terraza alta: Antiguo nivel aluvial elevado respecto del cauce actual, con estabilidad geomorfológica relativa. Los suelos presentan mayor desarrollo y menor influencia de inundaciones que los del plano aluvial.
- Vía de escurrimiento: Depresión lineal o traza natural del relieve por donde se concentra el escurrimiento superficial durante eventos de precipitación. Los suelos se caracterizan por su alta variabilidad y por procesos alternantes de erosión y deposición.

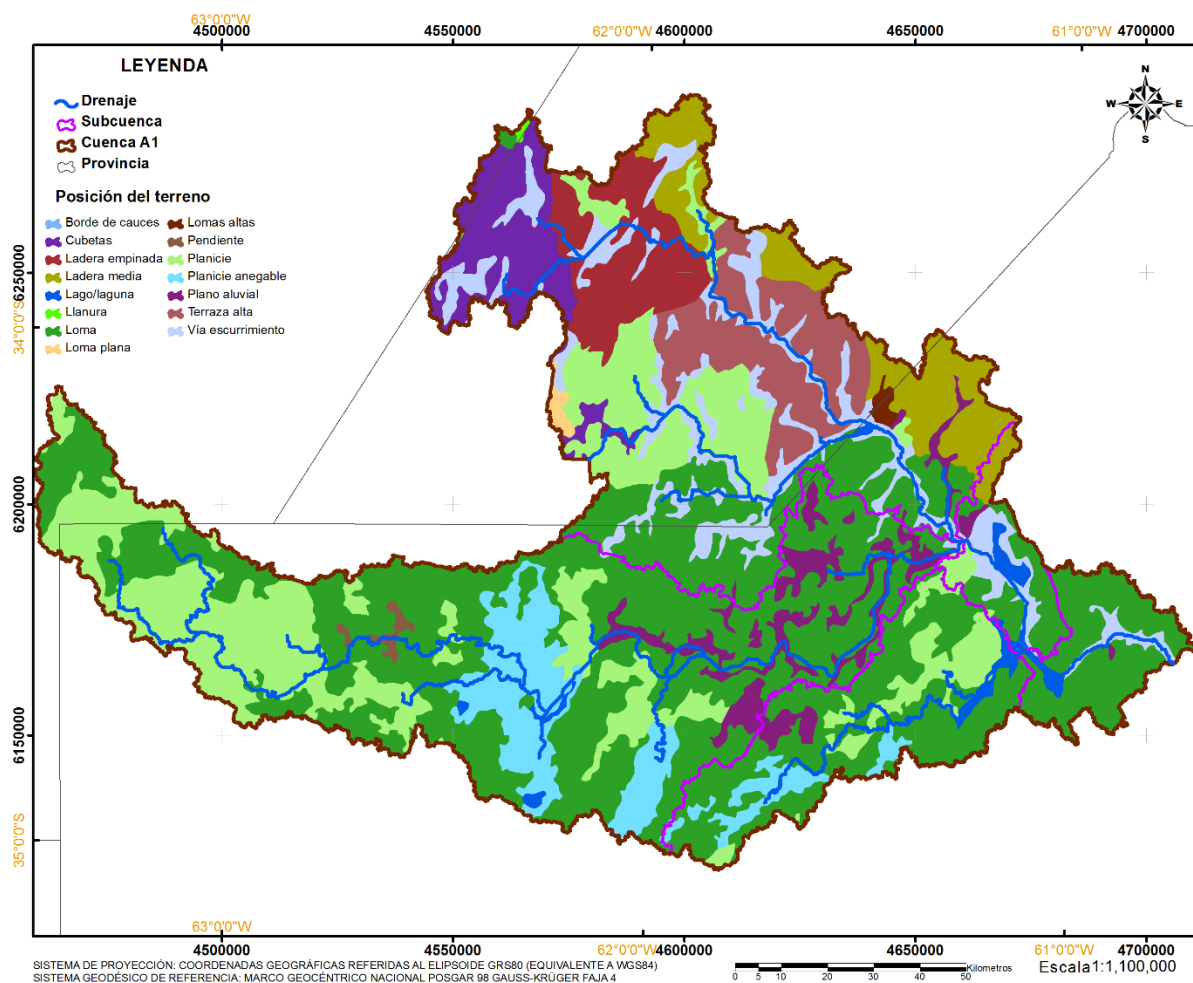


Figura 4.9 Detalle de posición del terreno en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

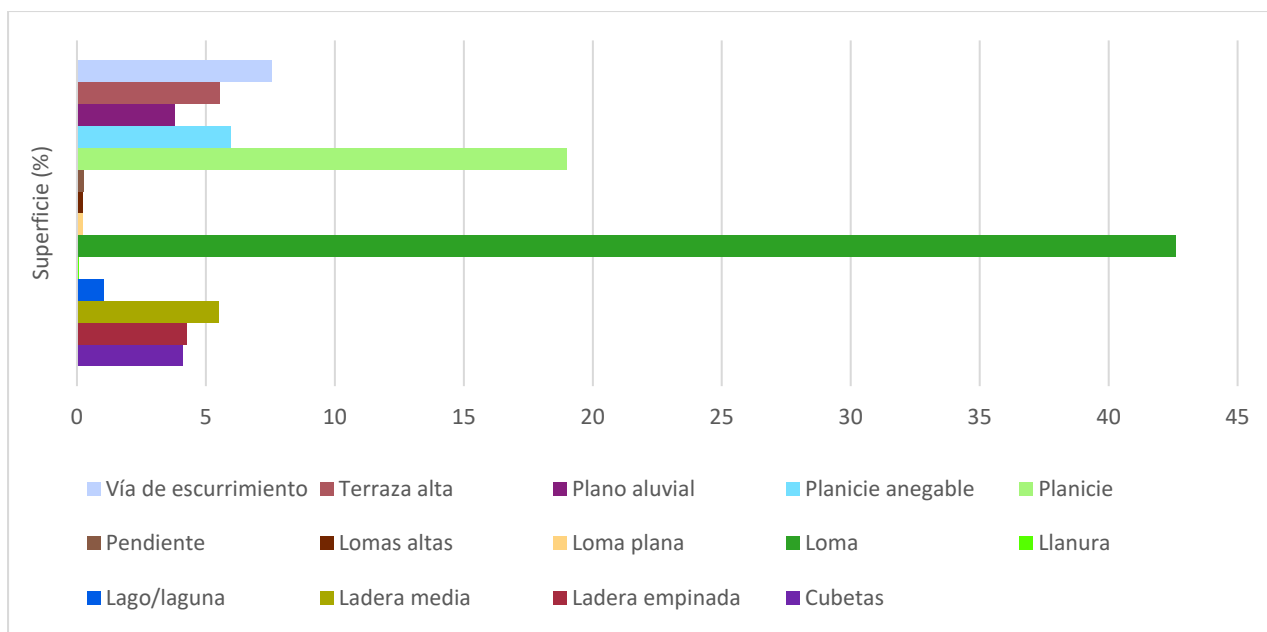


Figura 4.10 Superficie porcentual de ocupación por posición del suelo en la cuenca A1.

A partir de la Figura 4.10 y la Tabla 4.2 se interpreta el porcentaje de ocupación por posición del suelo a nivel de subcuenca, donde predominan los relieves de loma que abarcan aproximadamente el 43%; las planicies cubren un 19 %; el 7,5 % está dado por las vías de escurrimiento; las terrazas altas, planicie anegable, y ladera media presentan superficies semejantes con 5 % y finalmente las laderas empinadas, cubetas y plano aluvial ocupan 4 % cada una. En color gris se presentan las predominantes.

Tabla 4.2. Porcentaje de ocupación en superficie según posición del terreno a nivel de subcuenca.

Posición del terreno	Subcuenca				
	1	2	3	4	5
Cubetas		4,1%			
Ladera empinada		4,2%			
Ladera media		5,1%	0,4%		
Laguna	0,2%		0,3%	0,3%	0,2%
Llanura		0,1%			
Loma	23,7%	6,3%	1,4%	7,3%	3,9%
Pendiente	0,3%				
Loma plana		0,2%			
Lomas altas		0,2%			
Planicie	10,7%	5,9%	0,3%	2,1%	
Planicie anegable	4,8%			1,2%	
Plano aluvial	2,9%	0,3%	0,1%	0,4%	
Terraza alta		5,5%			
Vía de escurrimiento	0,1%	6,2%	0,8%		0,4%

De la Tabla 4.2 se interpreta que los ambientes de loma y planicies se hallan representados en todas las subcuencas. En particular, con más del 1% de ocupación, en la Subcuenca 1 predominan también planicies anegables y planos aluviales; en la subcuenca 2 hay cubetas, laderas empinadas / media, lomas y terraza alta, expresando la mayor variabilidad; y en la subcuenca 4, además, presenta planicies anegables. La mayor variabilidad de ambientes se destaca en la subcuenca 2 y la menor cantidad en la subcuenca 5.

4.5.2 Tipo drenaje

El drenaje de una cuenca, es decir como circula el agua en la misma, está influenciado por la longitud y forma de la cuenca, las pendientes del cauce principal y la pendiente del terreno/ paisaje. En el caso de las llanuras sin o con mínima pendiente, el terreno presenta depresiones locales, donde se almacenan las precipitaciones, formando encharcamientos poco profundos y pantanosos.

Al describir la disposición y tipo de drenaje se visualizan las características previamente citadas. Según Jahn (2006) de FAO, se establece una clasificación para los distintos tipos de drenaje según:

- Drenaje Pobre. El suelo permanece saturado la mayor parte del tiempo, el agua es evacuada tan lentamente que el suelo está húmedo a escasa profundidad periódicamente durante la estación de crecimiento o permanece saturado por largos períodos de tiempo. El agua libre es frecuente a poca profundidad o en la superficie en la estación de crecimiento durante el tiempo suficiente para que la mayoría de los cultivos mesofíticos no puedan crecer a menos que el suelo se drene artificialmente. Sin embargo, el suelo no está húmedo de forma continua justo debajo de la profundidad de arado. Es habitual la presencia de agua libre a escasa profundidad. Esta capa freática es comúnmente consecuencia de una baja o muy baja conductividad hidráulica saturada, de lluvias casi continuas o de una combinación de ambas circunstancias. Corresponde a suelos hidromórficos o hidro-halomórficos.
- Drenaje imperfecto: El agua libre o gravitante sale lentamente del suelo, el que permanece mojado por períodos significativos. Los perfiles presentan normalmente moteados en la parte inferior del horizonte A o inmediatamente por debajo del mismo. Corresponde a integrados entre suelos hidromórficos y automórficos.
- Drenaje Moderado. el agua es evacuada del suelo con cierta lentitud en algunos períodos del año. El agua libre interna suele ser moderadamente profunda y de transitoria a permanente. Los suelos están húmedos sólo un corto período de tiempo en las raíces durante la estación de crecimiento, pero el suficiente para tener un efecto sobre la mayoría de los cultivos mesofíticos. Normalmente tienen una conductividad hidráulica saturada moderadamente baja o baja en la capa del metro superior, reciben periódicamente altas precipitaciones, o ambas circunstancias. Puede haber débiles moteados en los horizontes B al C. Corresponde típicamente a los suelos automórficos, también llamados zonales o climatogénicos.
- Drenaje bien drenado. El exceso de agua se retira con facilidad, pero no con rapidez. El agua libre interna es comúnmente profunda o muy profunda; de duración anual no especificada. El agua está disponible para la vegetación durante la mayor parte de la estación de crecimiento en las regiones húmedas. Los excesos de humedad no inhiben el crecimiento de las raíces en períodos significativos durante la estación de crecimiento. Suelos sin síntomas de hidromorfismo en el solum. Corresponde típicamente a los suelos automórficos.

- Drenaje algo excesivo. El agua gravitante se retira con rapidez. La presencia de agua libre interna es comúnmente muy rara o se da a mucha profundidad. Los suelos normalmente son de textura gruesa y tienen una conductividad hidráulica saturada alta o son muy poco profundos. Corresponde a zonas integradas por suelos automórficos y Regosoles arenosos (azonales).

Estas clases de drenaje en la cuenca A1 se distribuyen según la Figura 4.11 y Figura 4.12.

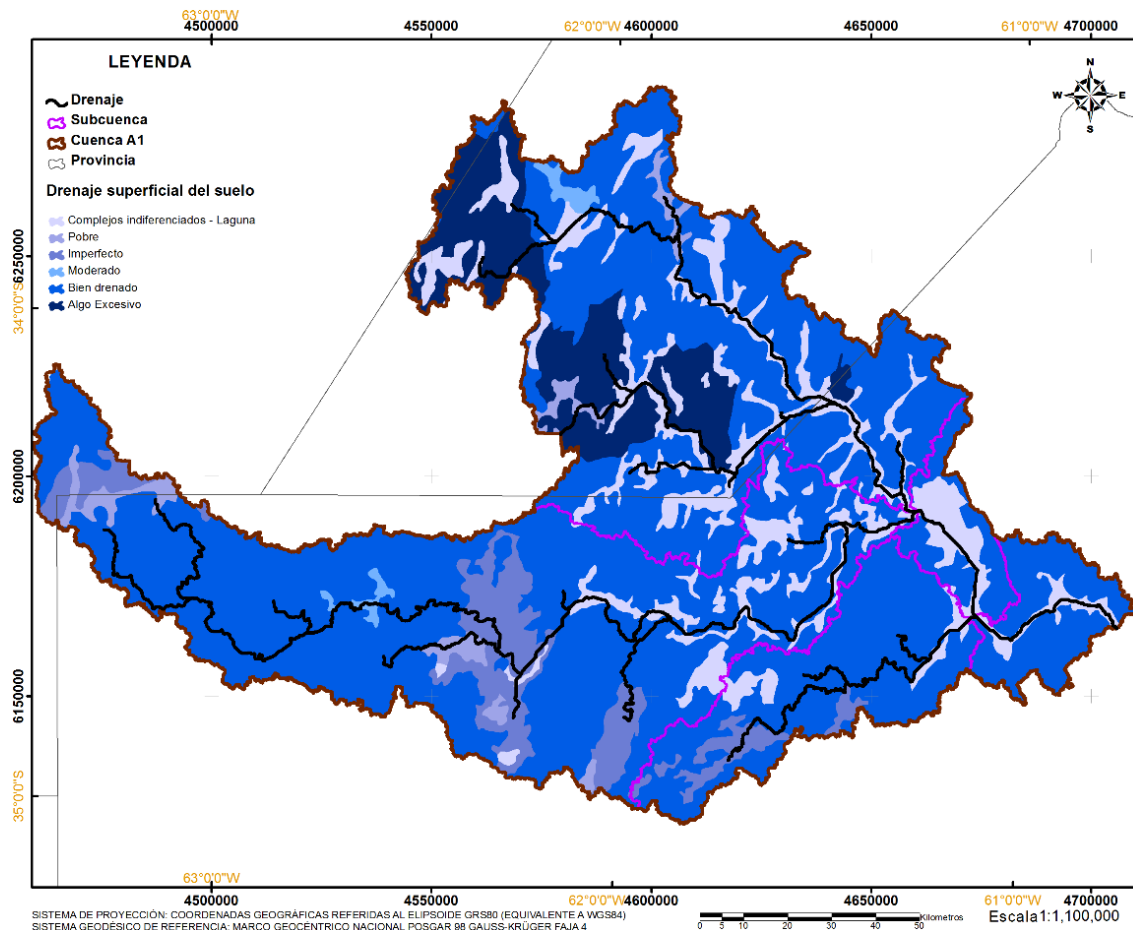


Figura 4.11 Zonificación de los tipos de drenaje del suelo en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

Los porcentajes de ocupación de los distintos tipos de drenaje superficial en la cuenca son los siguientes: 69,76 % correspondiente a áreas bien drenadas, 9,01 % con drenaje algo excesivo, 6,29 % con drenaje imperfecto, 1,98 % con drenaje pobre y 0,64 % con drenaje moderado. La distribución espacial de estas categorías a escala de subcuenca se presenta en la Figura 4.12.

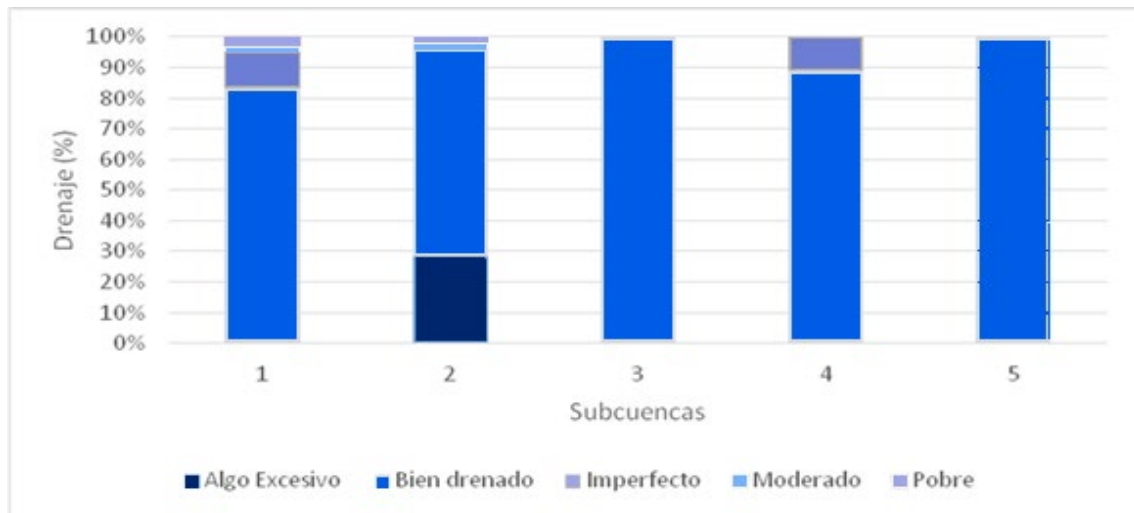


Figura 4.12 Tipos de drenaje del suelo en las subcuencas.

En la Figura 4.13, se observan los tipos de cuerpos de agua presentes en la cuenca A1 que fueron analizados de la base de datos IGN (s.f.) que clasifica como lagunas permanentes (si mantienen agua todo el año) y no permanentes (estacionales, temporales) y bañados que son zonas que son una mezcla de ambos, con aguas superficiales y saturación del suelo, pueden ser permanentes o estacionales (bañados), ricos en biodiversidad.

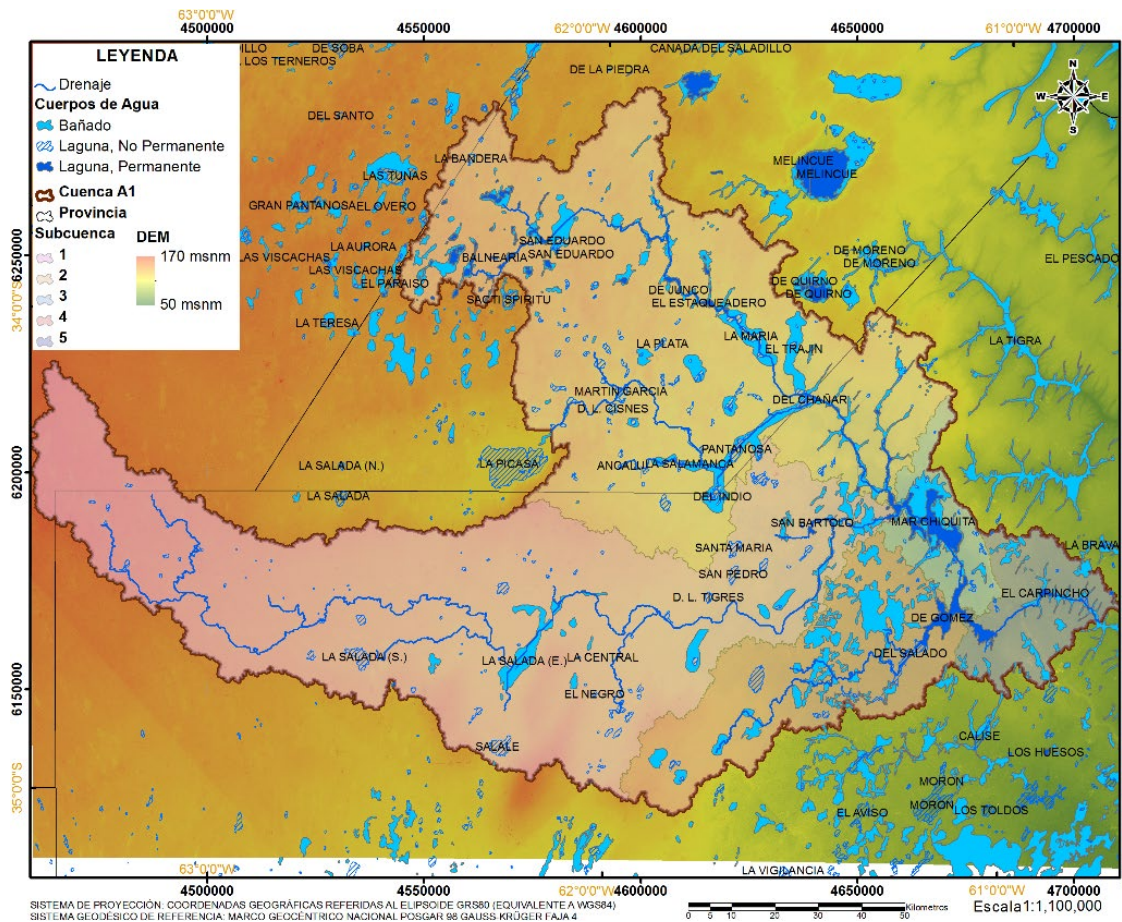


Figura 4.13 Detalle de tipos de cuerpos de agua. Fuente: Adaptado de IGN (s.f.).

La Tabla 4.3 expresa la superficie ocupada en cada provincia por los cuerpos de agua (lagunas y bañados) transitorios y permanentes, según IGN (s.f.), siendo que en la cuenca A1, 497 km² están ocupados por cuerpos de agua laguna, en los que se distinguen aproximadamente 200 km² de tipo permanente y alrededor de 300 km² de tipo no permanente. Se desarrollan principalmente en la Provincia de Buenos Aires (325 km²), mientras que en la Provincia de Santa Fe ocupan 169 km² y presentan un escaso desarrollo en la de Córdoba. Por otro lado, los bañados multiplican por dos veces y media la superficie ocupada por las lagunas, en particular aquellos de tipo no permanente, teniendo en general una buena representación en las tres provincias (Buenos Aires 836 km² totales; Córdoba 19 km² totales y Santa Fe 498 km² totales).

Tabla 4.3. Superficie de tipos de cuerpos de agua en la cuenca A1.

Cuerpo de agua	Tipo	Superficie (km ²)				
		Buenos Aires	Córdoba	Santa Fe	Subtotal/ tipo	Subtotal/ cuerpo
Lagunas	permanente	143,54	0,017	54,18	197,737	497,567
	no permanente	182,12	2,11	115,6	299,83	
Bañados	permanente	1,57	17,78	0	19,35	1.283,06
	no permanente	834,76	0,93	428,02	1.263,71	

4.6 Suelos

El suelo es concebido como un cuerpo natural organizado en horizontes, desarrollado sobre la superficie terrestre a partir de la interacción entre el clima, los organismos, el material originario, el relieve y el tiempo, y cuya comprensión resulta fundamental para sustentar decisiones vinculadas al uso y manejo de la tierra (SAGyP–INTA, 1990; Porta Casanellas *et al.*, 2014). El conocimiento de las propiedades edáficas y de su variabilidad espacial adquiere especial relevancia en regiones con marcada orientación agropecuaria, como la región pampeana, donde los procesos productivos intensivos exigen una adecuada evaluación de las potencialidades y limitaciones de los suelos para evitar su degradación y asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Casas & Albarracín, 2015). En este contexto, los relevamientos de suelos desarrollados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) constituyen una herramienta técnica clave, ya que permiten identificar, clasificar y cartografiar unidades edáficas relativamente homogéneas mediante trabajos integrados de gabinete, campo y laboratorio, generando Cartas de Suelos acompañadas por memorias descriptivas e interpretativas orientadas a la planificación del uso del suelo, la evaluación de la aptitud de las tierras y el ordenamiento territorial a distintas escalas (SAGyP-INTA, 1989 ; 1990).

A partir de los mapas publicados en el Atlas de Suelos de la provincia de Buenos Aires (versión digital), a escala 1:500.000 (SAGyP-INTA, 1989), la información fue procesada mediante SIG y ajustada al límite de la cuenca bajo estudio. La base de datos geoespacial resultante fue sometida a un proceso de corrección y armonización espacial, con el objetivo de optimizar su compatibilidad con el resto de las capas geográficas empleadas y de reducir inconsistencias detectadas en relación con imágenes satelitales y cartografía topográfica y de cobertura del suelo.

4.6.1 Zonificación edáfica

En la Tabla 4.4 se presenta los suelos que se encuentran en el área de estudio, según su clasificación taxonómica de SAGyP-INTA (1989).

Tabla 4.4. Clasificación de suelos presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

Orden	Suborden	Gran grupo	Subgrupo
Molisoles	Udoles	Hapludoles	tapto-árgicos
			tapto-nátricos
			énticos
			típicos
	Acuoles	Argiudoles	típicos
		Natracuoles	típicos
		Haplustoles	udorténticos
Alfisoles	Alboles	Natralboles	típicos
	Acualfes	Fragicualfes Natracualfes	típicos

Los suelos del área de estudio pertenecen al orden de los Molisoles en un 98 % de su superficie y un poco menos del 1 % corresponden al orden de los Alfisoles e identificando también complejos indiferenciados.

Los molisoles se encuentran asociados a gran diversidad de paisajes. El material predominante (loess) y los regímenes de humedad y temperatura térmica son factores que favorecieron la formación del epipedón mólico. Los subórdenes más difundidos dentro de este orden son los Udoles y los Ustoles, que conforman suelos “zonales” y se localizan en las partes altas con relieve ondulado o suavemente ondulado y con buen drenaje. Otro suborden que encuentra buena representación en la cuenca es el de los Acuoles, los que aparecen en terrenos planos y bajos, con escurrimiento dificultoso, en los que la capa freática alta afecta al perfil del suelo por períodos de tiempo prolongados. Finalmente, el suborden de los Alboles se desarrolla en sectores planos (divisoria de aguas), en los que la permanente infiltración de agua en el perfil origina un horizonte superficial lixiviado (A2).

Dentro del suborden de los Udoles (Tabla 4.4), se destacan en la cuenca A1 dos Grandes Grupos que son:

- Hapludoles: se localizan en general en zonas con materiales más gruesos que los loésicos. Alcanzan un desarrollo incipiente debido a tres razones principales: los materiales arenosos son más resistentes a la meteorización; el clima de la región es menos húmedo; y la exposición de los sedimentos a la acción edáfica es breve, dado el aporte eólico permanente que proviene de los vientos del oeste.
 - Subgrupo tapto-árgico, que son suelos poligenéticos, donde la parte superior del perfil alcanza de 30 a 50 cm, en la que el horizonte A del suelo actual sepulta un B textural formado en el sedimento más antiguo durante un período de edafización anterior. Este

subgrupo se clasifica así por poseer un B textural enterrado de reacción neutra, que probablemente haya pertenecido a un árgiudol Típico

- Subgrupo tapto-nátrico: se diferencia del anterior porque el horizonte B textural sepultado tiene más del 15 % de Na de cambio y originalmente fue parte de un Natracuol o un suelo similar.

Ambos subgrupos (Tapto-árgico y Tapto-nátrico) se localizan en pequeñas lomas que emergen de un sector plano en general. Son suelos que presentan pequeños problemas de hidromorfismo debido al contraste de permeabilidad que se produce en la discontinuidad litológica, originando una falsa capa de agua apoyada sobre el Bt que suele cementar la parte inferior del sedimento superficial.

- Subgrupo éntico: es el Hapludol que menor desarrollo de los perfiles manifiesta. Es característico de los ambientes inestables de naturaleza arenosa, donde el paisaje es ondulado-medanoso. El perfil muestra un horizonte superior moderadamente provisto de materia orgánica, con estructura débil, susceptible a la erosión eólica y excesivamente permeable
- Subgrupo Típico: este suelo manifiesta un horizonte B algo más definido que el anterior por una ligera estructuración, por lo que resulta buen regulador de la economía del agua. Se encuentra en paisajes más estables que los énticos, con mayor cobertura vegetal y con un horizonte A mejor estructurado y más resistente a la acción del viento.
- Argiudoles: presentan clima húmedo o subhúmedo sobre materiales loésicos, en posiciones bien drenadas. La sucesión de horizontes (A1- B1- B2t- B3- C) está bien manifiesta, el enriquecimiento de materia orgánica en el horizonte A y el incremento de arcilla en el B2t, son los rasgos característicos más notorios de este Gran Grupo, que presenta algunas variaciones de pendiente de la ubicación geográfica de los perfiles. Estas diferencias se vinculan con cambios de humedad y, también influye las diferentes texturas del material original.
- Argiudoles típicos, subgrupo presente en la cuenca A1, son suelos sobre los que se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola de la Provincia de Buenos Aires y, excepto en las fases inclinadas o someras, no presentan ningún tipo de limitación.

Otro suborden presente es el de los Acuoles, con el Gran Grupo Natracuoles típicos. Son suelos sódicos. Tienen un perfil característico con un horizonte superficial neutro o ligeramente alcalino de menos de 20 cm de espesor, con estructura granular o en bloques, al que le sigue el horizonte nítrico, prismático o columnar, de 40 cm de potencia y más del 50 % de Na cambiante. Los horizontes B3 y C tienen casi siempre concreciones de carbonato de calcio con diverso grado de cementación y en grandes sectores presenta tosca en plancha a menos de 50 cm de profundidad. A pesar de las limitaciones impuestas por el tenor de sodio, el hidromorfismo y, a veces la profundidad, hace que tengan un horizonte superficial que permite algunas prácticas agrícolas.

El suborden de los Ustoles se encuentra en sitios donde impera el régimen ústico. Dentro de éste encontramos el Gran Grupo de los Haplustoles que, son similares a los Hapludoles pero, en general, de colores más grises, con horizontes menos diferenciados y con estructuras más sueltas. En la cuenca A1, se registran los Haplustoles del subgrupo Udorténtico.

Finalmente, dentro del Suborden Alboles se encuentra el Subgrupo Natralboles típico que, si bien se encuentra en las adyacencias de lagunas o cubetas, generalmente aparece en lugares deprimidos plano-cóncavos donde el drenaje es dificultoso. En los Natralboles se observa un contraste bien

marcado entre el horizonte álbico y el B textural, que en general tiene una fuerte estructura columnar y está tapizado por oscuros barnices de materia orgánica.

Por último, el Orden Alfisoles se vincula con zonas de escurrimiento superficial dificultoso y sometido a inundaciones periódicas, por lo que se producen acumulaciones de sales de sodio en superficie impidiendo el desarrollo de un epipedón mólico. Estas condiciones, en términos locales, se registran en pequeñas áreas deprimidas o microrelieves cóncavos. Dentro de los Alfisoles se encuentra el suborden Acualfes que, en la cuenca se expresa en el suborden Fragiacualfes Típicos, el cual está restringido a cubetas y hoyadas entre médanos. Tienen un horizonte cementado en profundidad, saturados de agua durante gran parte del año y con períodos de encharcamiento. Los Natracualfes son suelos halomórficos (salinos y sódicos) que se encuentran en zonas bajas, caracterizados por tener un horizonte superficial (A) delgado y fértil, pero con acumulación de sodio y sales a poca profundidad, haciéndolos limitados para agricultura, pero aptos para ganadería en ambientes de campos bajos, clasificados dentro de los suelos de baja fertilidad natural que requieren enmiendas para cultivo.

En la Figura 4.14 se observa la distribución de los subórdenes descriptos y la superficie de desarrollo se presenta por subcuenca en la Tabla 4.5.

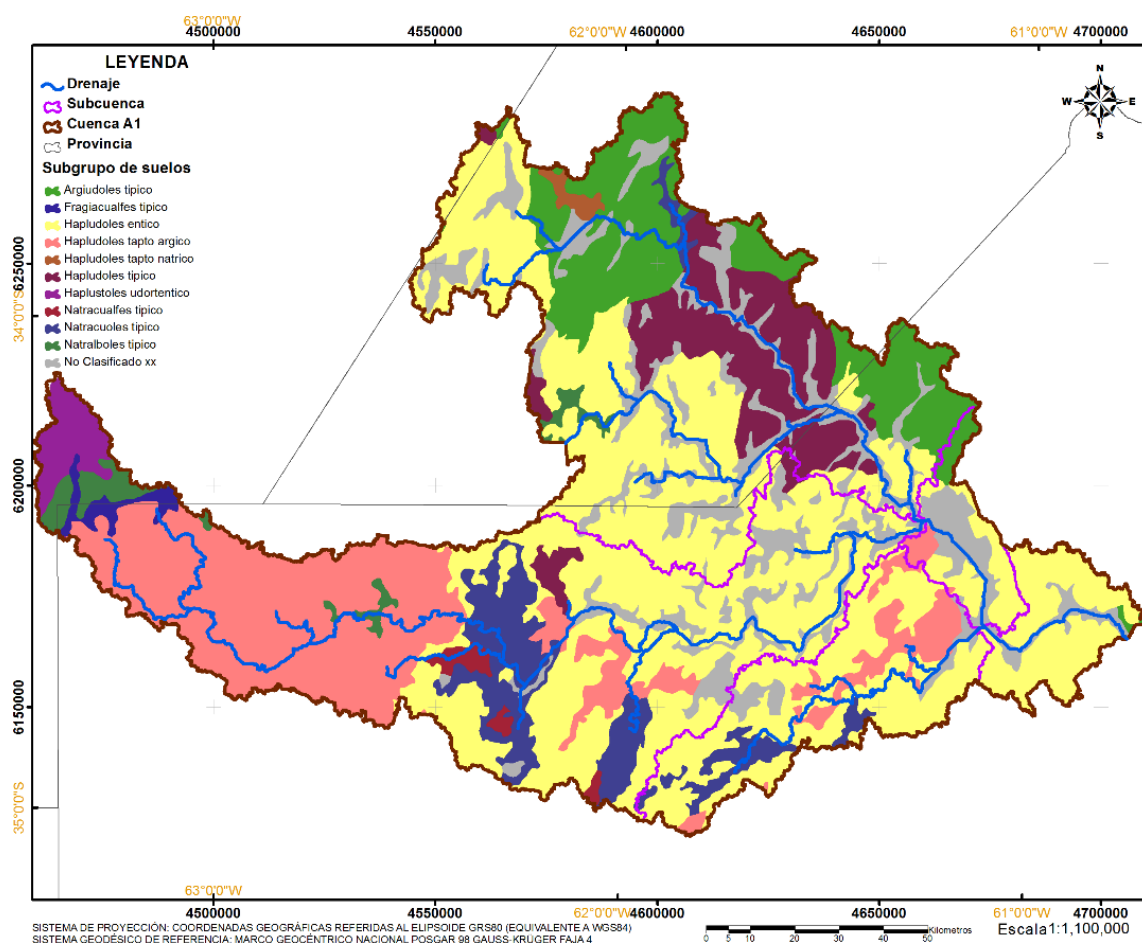


Figura 4.14 Zonificación de Subgrupo de suelos del área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

Tabla 4.5. Superficie de ocupación del Subgrupo de suelos en el área de estudio.

Tipo de suelo	Subcuenca (Porcentaje de ocupación)				
	1	2	3	4	5
Argiudoles típico		9,42	0,38		0,08
Fragiacualfes típico	0,67				
Hapludoles éntico	15,27	14,21	1,43	7,32	3,80
Hapludoles tapto-árgico	15,39		0,27	2,11	
Hapludoles tapto-nátrico		0,37			
Hapludoles típico	0,60	6,89			
Haplustoles udorténtico	1,58				
Natracualfes típico	0,61				
Natracuoles típico	4,21	0,36		1,15	
Natralboles típico	1,20	0,35			
No Clasificado xx	3,22	6,54	1,28	0,67	0,62

A continuación, se describe para la zona en estudio cada una de las características edáficas predominantes.

4.6.2 Limitantes principales del suelo

Se conocen como factores limitantes a aquellas propiedades y características del medio geográfico que influyen en el desarrollo de los cultivos, es decir, son aquellas que en un momento determinado influyen negativamente en el desarrollo de los cultivos. Estas resultan de las características edafológicas y los procesos de degradación del suelo por influencia antropogénica.

Los limitantes principales descritas por SAGyP-INTA (1989) presentes en el área de estudio, se puede observar su zonificación en la Figura 4.15 y en la Tabla 4.6 se observa la superficie porcentual de ocupación a nivel de subcuenca. En orden decreciente de importancia, se identificaron las siguientes limitantes en la A1:

- Susceptibilidad a erosión eólica: El fenómeno está vinculado a la falta de lluvias en época de vientos secos, por lo que se deben considerar, para el cálculo de esta limitante, precipitaciones, manejo de suelo, que puede aumentar la exposición del suelo a vientos desecantes, y la distribución de las precipitaciones.
- Drenaje deficiente: El drenaje deficiente implica la saturación del suelo en condiciones tales que el exceso de agua no permite más infiltración. También se considera un drenaje deficiente cuando se reduce la capacidad de infiltración debido a la compactación del suelo o la presencia de capas poco permeables. En suelos con drenaje deficiente, el agua de lluvia infiltra con lentitud, y por ello, el suelo permanece con excesiva humedad durante períodos cortos, impidiendo una buena absorción de nutrientes y favoreciendo el desarrollo de enfermedades fúngicas y bacterianas.
- Susceptibilidad a inundación o anegamiento: Estas zonas son sectores del territorio que, por sus condiciones edáficas, topográficas e hidrológicas, tienden a acumular agua en superficie o en los primeros horizontes del suelo de manera temporaria o recurrente, especialmente luego de eventos de precipitación intensa o prolongada.

- Alcalinidad a menos 50 cm: son suelos con valores de pH por encima de 8,5 o con un porcentaje mayor al 15 % de sodio intercambiable presentan un valor de alcalinidad que imposibilita el crecimiento de la mayoría de las plantas cultivadas.
- Susceptibilidad a erosión hídrica: Corresponden a sectores donde el suelo presenta alta probabilidad de pérdida de material superficial por acción del agua, principalmente a través del impacto de las gotas de lluvia y del escurrimiento superficial concentrado o difuso.
- Erosión eólica: Esta limitante está referida a la remoción y transporte del material de la superficie del suelo por acción del viento.
- Baja retención de humedad: En líneas generales esta limitante no reviste relevancia en la cuenca.
- Limitante por características climáticas: Las limitantes incluyen variables como la temperatura, la precipitación, la humedad relativa (baja o alta) y la incidencia de las heladas. Además, una combinación de altas temperaturas, baja precipitación y humedad relativa baja o alta en las fases críticas del ciclo de producción son determinantes para obtener una buena producción.
- Áreas sin limitaciones: Tierras que no presentan ninguna limitación para su uso.
- No apto agricultura: Son zonas sin aptitud para las actividades agrícolas.

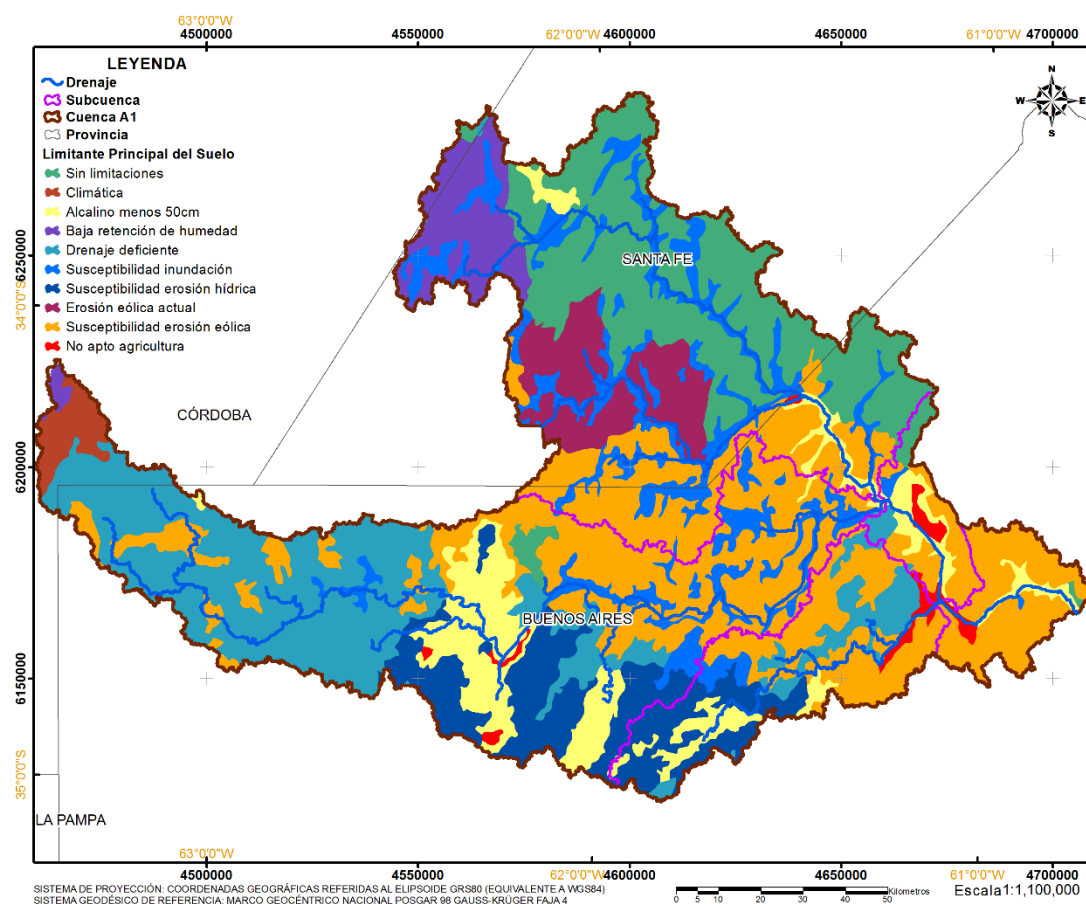


Figura 4.15 Limitantes principales presentes en el área de estudio Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

La Tabla 4.6 muestra la distribución porcentual de las principales limitantes edáficas en las subcuencas analizadas, evidenciando una marcada heterogeneidad espacial. En todas las subcuencas se destaca la susceptibilidad a la erosión eólica como la limitante dominante, con valores particularmente elevados

en las subcuencas 3, 4 y 5, donde supera el 40 % y alcanza un máximo del 84,5 %, lo que refleja la combinación de texturas livianas, baja cobertura vegetal y condiciones climáticas favorables a este proceso. Desde una perspectiva hidrológica, la presencia de drenaje deficiente, especialmente en las subcuencas 1 y 4, sugiere sectores con restricciones a la infiltración y mayor probabilidad de encharcamientos temporarios, coherente con los porcentajes observados de susceptibilidad a inundaciones o anegamiento, particularmente en las subcuencas 1 y 2. Asimismo, la alcalinidad subsuperficial a menos de 50 cm adquiere relevancia en la subcuenca 3, lo que puede limitar el desarrollo radicular y alterar los flujos de agua en el perfil del suelo. La baja retención de humedad, presente principalmente en la subcuenca 2, indica una menor capacidad de almacenamiento hídrico, con implicancias negativas para la regulación del agua disponible para los cultivos. Finalmente, la presencia de áreas clasificadas como no aptas para la agricultura y aquellas sin limitaciones, aunque minoritarias, refuerzan la necesidad de considerar la variabilidad edáfica en la evaluación del comportamiento hidrológico y productivo de cada subcuenca.

Tabla 4.6. Porcentaje de ocupación por limitante principal de suelos de las subcuencas.

Limitante principal	Subcuenca (Porcentaje de ocupación)				
	1	2	3	4	5
Alcalinidad menos 50cm	11,6	2,6	25	10,2	9,8
Baja retención humedad	0,6	9,9			
Características climáticas	3,1				
Drenaje deficiente	34,9	0,2	8,2	18,7	
Erosión eólica		13,2			
No apto agricultura	0,4	0,1	9,9	2,6	3,4
Sin limitaciones	1,1	39,4	11,4		1,8
Susceptibilidad erosión eólica	27,8	17,3	42,6	41,1	84,5
Susceptibilidad erosión hídrica	12,9			23,9	
Susceptibilidad inundaciones o anegamiento	7,5	17,3	3	3,4	0,5

Las limitantes secundarias y terciarias están vinculadas principalmente a la estructura del suelo y la profundidad. Así las limitantes secundarias acompañan a las principales y se encuentran en un segundo orden por detrás de ellas y las terciarias se encuentran a mayor profundidad vinculadas a la estructura del suelo. En Figura 4.16 y Figura 4.17 se detallan las superficies afectadas por las limitantes secundarias y terciarias respectivamente y, en Tabla 4.7, se expresa la superficie de incidencia en porcentaje de cada una de ellas en la cuenca. Como surge de la anterior Tabla, además de las limitantes principales descritas, se detectaron las limitantes profundidad efectiva somera y salinidad en los primeros 50 cm, de orden secundario y terciario, las que se detallan a continuación:

- Profundidad efectiva somera: Se refiere a la profundidad hasta donde las raíces de los cultivos pueden penetrar en busca de agua y nutrientes. El horizonte A, es el que más materia orgánica presenta y el más rico en nutrientes, razón por la cual es el horizonte o capa que más cuidado requiere para que no se pierda o degrade y evitar la erosión por “salpicadura” (de la gota de agua).
- Salinidad en primeros 50 cm: Son suelos que se forman bajo condiciones de exceso de sales neutras o muy alcalinas. Por sobrerriego y por condiciones de mal drenaje afloran a la superficie sales minerales (cloruros y sulfatos), que intoxican el suelo y limitan o anulan la producción agrícola.

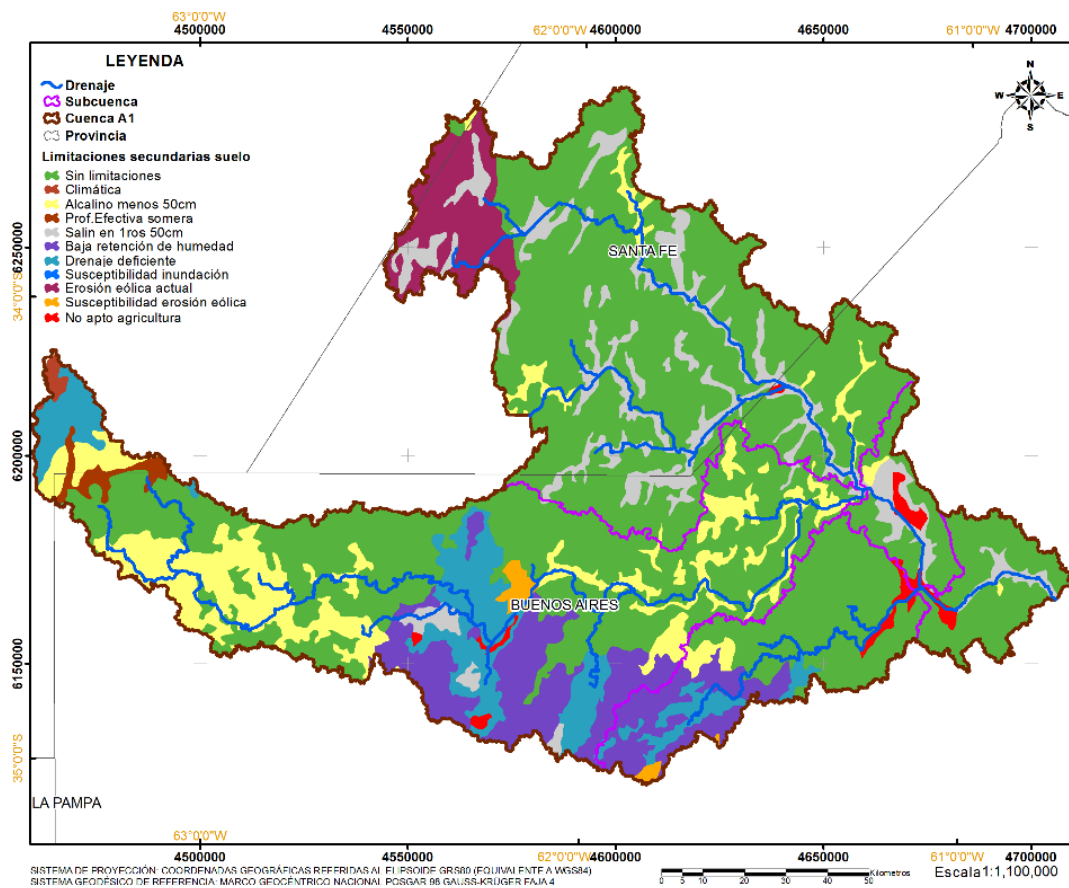


Figura 4.16 Limitantes secundarias presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

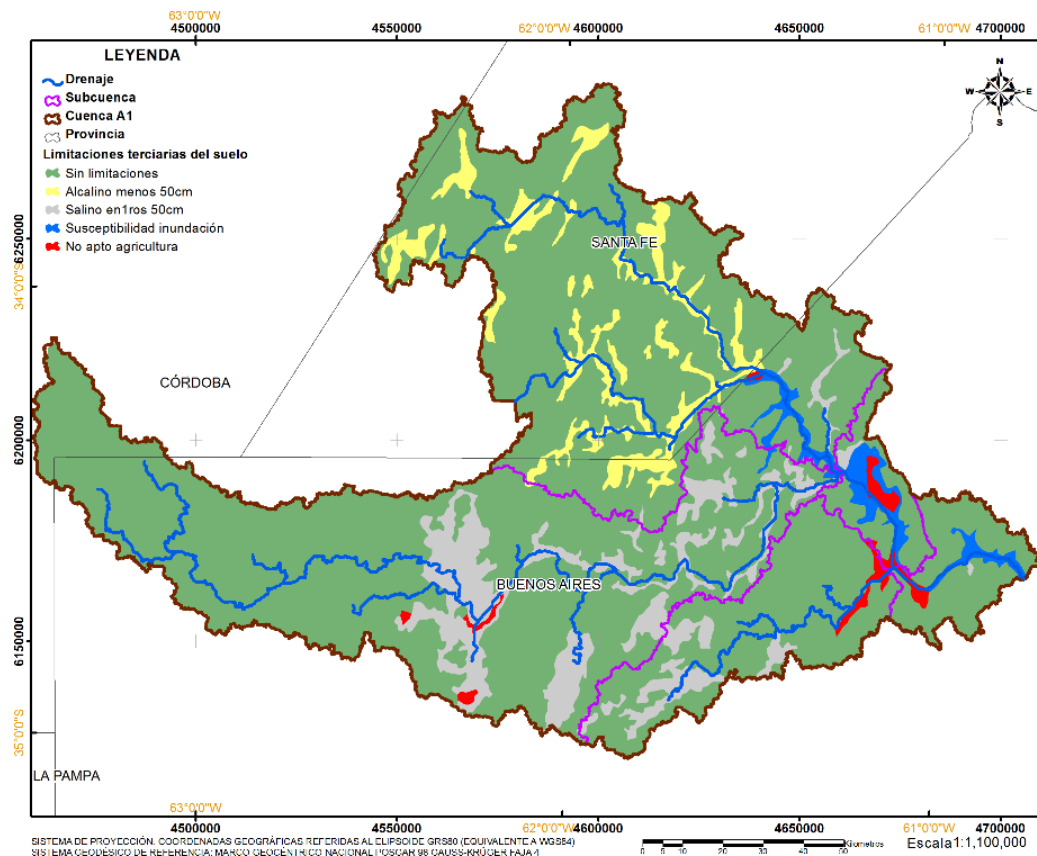


Figura 4.17 Limitantes terciarias presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

La Tabla 4.7 sintetiza la distribución porcentual de las principales limitantes edáficas identificadas en la cuenca A1, clasificadas según su jerarquía como principales, secundarias y terciarias. Entre las limitantes principales, se destacan la susceptibilidad a la erosión eólica (28,4 %) y el drenaje deficiente (17,4 %), lo que evidencia una combinación de suelos livianos y sectores con restricciones al movimiento del agua en el perfil, con implicancias directas sobre el comportamiento hidrológico y el uso productivo del territorio. Asimismo, la susceptibilidad a inundaciones o anegamiento (10,3 %) y la susceptibilidad a erosión hídrica (8,2 %) indican la coexistencia de procesos asociados tanto al exceso como al déficit de drenaje, reflejando la heterogeneidad interna de la cuenca. La alcalinidad subsuperficial a menos de 50 cm también adquiere relevancia como limitante estructural del suelo. En cuanto a las limitantes secundarias, predomina la categoría sin limitaciones (60,2 %), seguida por la profundidad efectiva somera (70,0 %), lo que sugiere restricciones al desarrollo radicular y al almacenamiento de agua en el perfil en amplios sectores. Finalmente, las limitantes terciarias muestran un claro predominio de áreas sin limitaciones (82,3 %), mientras que la salinidad en los primeros 50 cm y la susceptibilidad a inundaciones presentan una participación menor pero significativa, reforzando la necesidad de considerar estas restricciones en los análisis hidrológicos y de aptitud de tierras de la cuenca A1.

Tabla 4.7. Superficie ocupada por las limitantes principales, secundarias y terciarias en el área de estudio.

Limitante principal	Cuenca A1 (Porcentaje de ocupación)		
	Principales	Secundarias	Terciarias
Alcalinidad menos 50cm	8,4%	10,5%	5,6%
Baja retención humedad	4,0%	8,2%	
Características climáticas	1,3%	0,2%	
Drenaje deficiente	17,4%	6,7%	
Erosión eólica actual	5,1%	3,8%	
No apto agricultura	1,0%	1,0%	1,0%
Sin limitaciones	16,0%	60,2%	82,3%
Susceptibilidad erosión eólica	28,4%	0,5%	
Susceptibilidad erosión hídrica	8,2%		
Susceptibilidad inundaciones o anegamiento	10,3%		2,0%
Profundidad efectiva somera		70,0%	
Salinidad en 1ros 50cm		8,1%	9,1

4.6.3 Textura

Se define como textura a la composición granulométrica del suelo. Cada termino textural se corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla, dependiendo de la naturaleza de la roca madre y de los procesos de evolución del suelo. Estos grupos de texturas presentan aptitudes o propiedades análogas. La fracción arcilla presenta varios minerales secundarios, que se clasifican en silicatos y no silicatos; en la fracción arena se describen fragmentos de roca principalmente cuarzo y otros minerales primarios; y la fracción de los limos está constituida por materiales heredados o transformados, son más similares a las arcillas en cuanto constituyen partículas monominerales con un alto contenido de filosilicatos en transformación o neoformación. Los suelos con texturas francas o equilibradas presentan equilibrio entre sus componentes. Los

términos texturales se definen en forma gráfica a partir de un diagrama triangular que representa los valores de las tres fracciones, según USDA (1960).

En la cuenca A1 se observaron las texturas franca, franco arenosa y franco limosa (Figura 4.18).

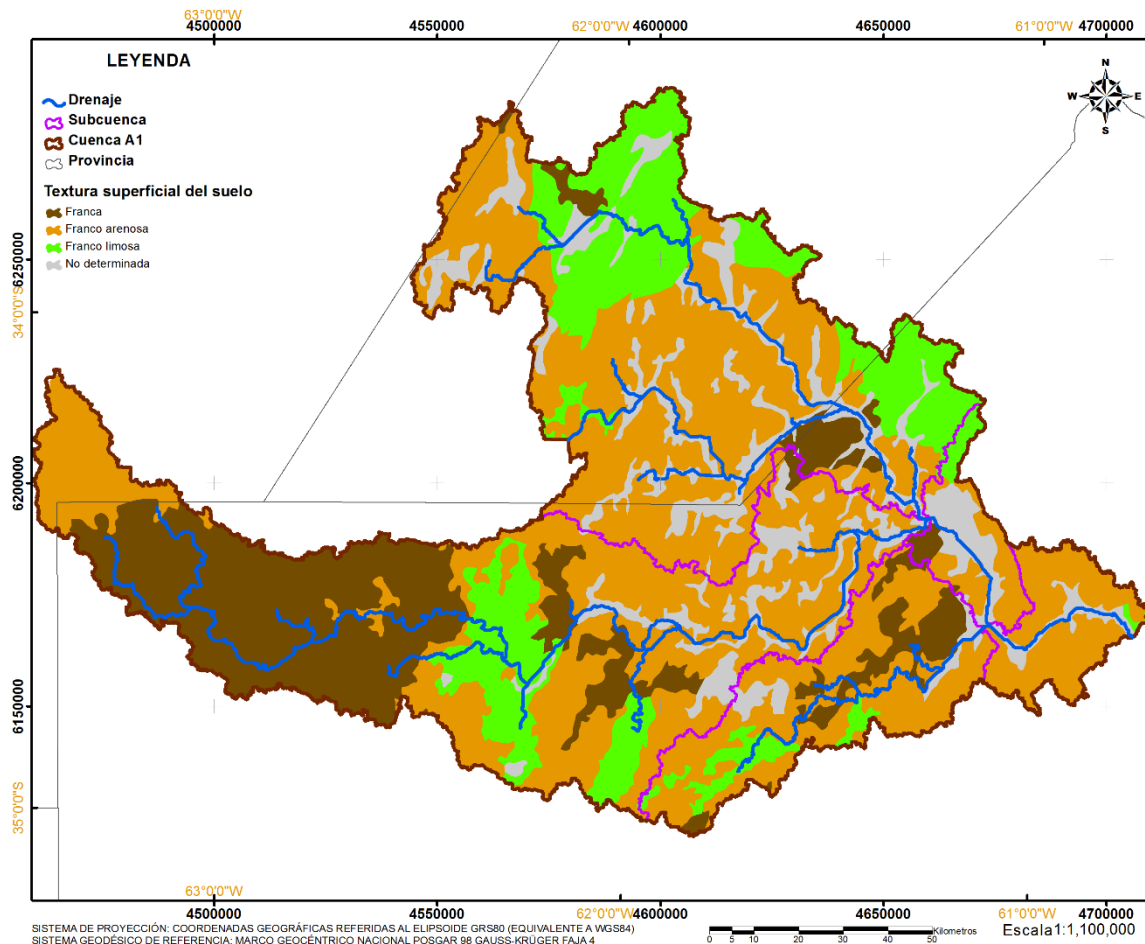


Figura 4.18 Texturas de suelo presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de SAGyP-INTA (1989).

De acuerdo con el diagrama textural de USDA y la zonificación del SAGyP-INTA (1989), la distribución en la cuenca es de 19,87 % de textura franca, 51,31 % de franco arenosa, 16,50 % de franco limosa y 12,33 % de una fracción no determinada. A nivel de subcuenca se presenta la Tabla 4.8.

La distribución de las clases texturales de los suelos en las subcuencas analizadas evidencia un claro predominio de texturas franco arenosas, lo que sugiere, desde el punto de vista hidrológico, una mayor permeabilidad y capacidad de infiltración, favoreciendo la recarga subsuperficial y reduciendo, en términos generales, el escurrimiento superficial directo. Este comportamiento resulta particularmente marcado en las subcuencas 4 y 5, donde dicha textura supera el 65 % y alcanza valores superiores al 80 %, respectivamente. En contraste, la mayor presencia de suelos de textura franca y franco limosa, especialmente en las subcuencas 1 y 2, indica sectores con una mayor proporción de finos, lo que podría asociarse a una menor conductividad hidráulica y a una mayor propensión al escurrimiento superficial y a procesos de encharcamiento temporario bajo condiciones de precipitaciones intensas. Asimismo, la elevada proporción de superficies con textura no determinada, particularmente en la subcuenca 3,

introduce un grado de incertidumbre en la interpretación hidrológica, que deberá ser considerado en los análisis posteriores de balance hídrico y modelización hidrológica de la cuenca.

Tabla 4.8. Superficie de texturas de suelos de las subcuencas del área de estudio.

	Superficie (%) subcuenca				
	1	2	3	4	5
Franca	37,4%	3,9%	8,2%	18,7%	0,0%
Franco arenosa	43,8%	52,5%	42,6%	65,0%	84,5%
Franco limosa	11,3%	26,4%	11,4%	10,2%	1,8%
No determinada	7,5%	17,2%	37,9%	6,0%	13,7%

4.6.4 Grupo hidrológico

La clasificación hidrológica de los suelos reconoce cuatro Grupos Hidrológicos de Suelo (GH), definidos en función de sus características texturales y de su comportamiento frente al movimiento del agua. Esta clasificación se basa en la estimación del potencial de escorrentía, asignando los suelos a uno de los cuatro grupos según su capacidad de infiltración cuando se encuentran completamente saturados, sin cobertura vegetal y bajo condiciones de precipitaciones intensas y de larga duración. De este modo, los Grupos Hidrológicos permiten evaluar y comparar la respuesta hidrológica de los distintos tipos de suelo frente a eventos de tormenta (Gaspari *et al.*, 2025). Los suelos se incluyen en cuatro GH según:

- Grupo A: suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Están formados principalmente por arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas, o arenas de textura gruesa. Estos suelos presentan una tasa elevada de transmisión de agua.
- Grupo B: suelos que tienen un índice de infiltración moderado cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados con una textura de moderadamente fina a moderadamente gruesa. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
- Grupo C: suelos que tienen un índice de infiltración lento cuando están completamente húmedos. Son principalmente suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta.
- Grupo D: suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos con un elevado nivel freático, suelos que presentan una capa de arcilla en la superficie o cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

La distribución de los cuatro grupos hidrológicos puede visualizarse en la Figura 4.19, la cual se generó por interpretación de la cartografía textural del SAGyP-INTA (1989). En ella se identificando que el GH A es predominante en la cuenca, ocupando el 78,77%, el GH C ocupa el 6,29%, el GH D está presente en 1,98% y el GH B sólo en el 0,64%. También se advierte que 12,33 % está sin clasificar.

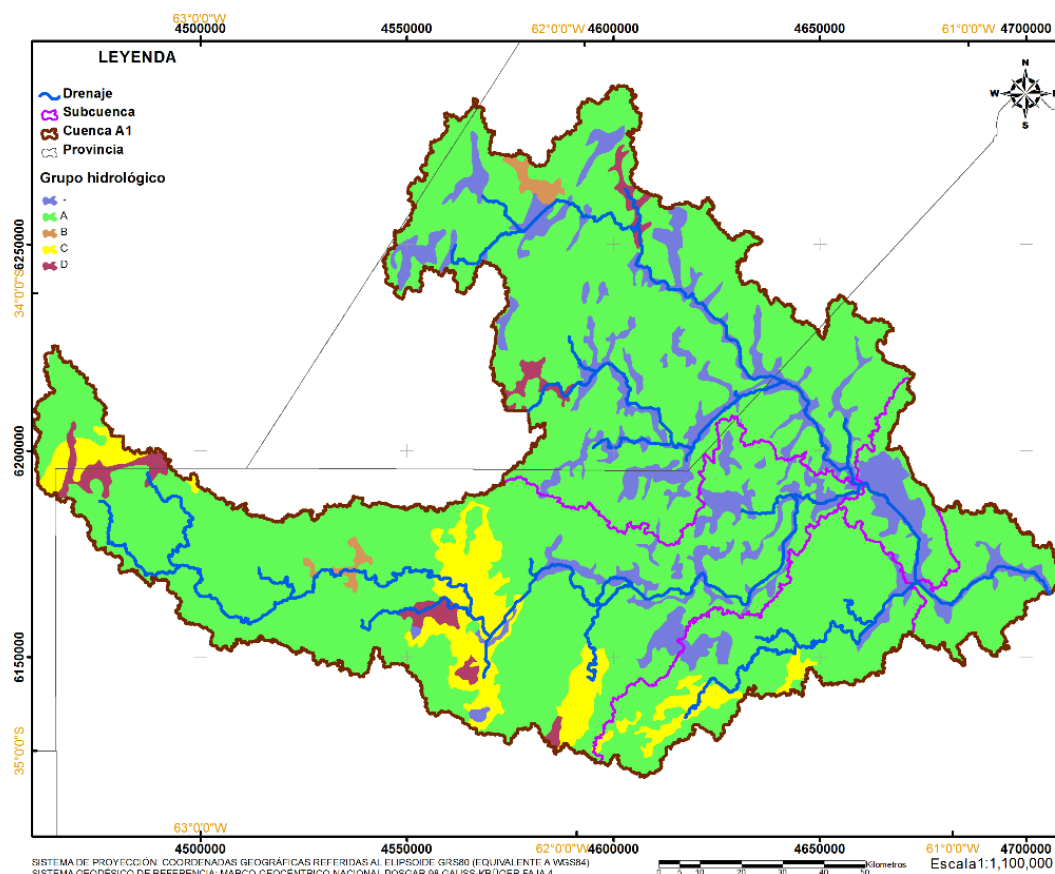


Figura 4.19 Detalle de los grupos hidrológicos presentes en las subcuencas.

Tabla 4.9. Ocupación en superficie (%) por grupo hidrológico a nivel de subcuenca.

Ocupación en superficie por subcuenca					
GH	1	2	3	4	5
A	76,8%	80,0%	62,1%	83,8%	86,3%
B	0,6%	1,0%			
C	12,0%			10,2%	
D	3,0%	1,8%			
s/d	7,5%	17,2%	37,9%	6,0%	13,7%

La Tabla 4.9. muestra la distribución porcentual de los GH en las cinco subcuencas analizadas. En todas ellas se observa un claro predominio del GH A, con valores superiores al 60 % y alcanzando máximos cercanos al 85 % en las subcuencas 4 y 5, que indica la presencia mayoritaria de suelos con alta capacidad de infiltración y bajo potencial de escorrentía superficial. Esta condición sugiere, desde el punto de vista hidrológico, una respuesta más atenuada frente a eventos de precipitación, favoreciendo la infiltración y la recarga subsuperficial. Los Grupos B, C y D, asociados a capacidades de infiltración intermedia a baja y a un mayor potencial de escurrimiento superficial, presentan una representación reducida y localizada, destacándose el Grupo C en las subcuencas 1 y 4, que podría vincularse a sectores con mayor contenido de finos o limitaciones internas del perfil del suelo. Por otra parte, la categoría sin datos (s/d) exhibe una participación significativa, especialmente en la subcuenca 3, lo que introduce un grado de incertidumbre en la caracterización hidrológica y deberá ser

considerado en instancias posteriores de modelización o balance hídrico. En conjunto, la distribución observada refleja un comportamiento hidrológico dominado por suelos de elevada infiltración, aunque con variaciones espaciales que pueden influir en la generación de escorrentía y en la dinámica hídrica de cada subcuenca.

4.7 Cobertura del suelo

La definición de cobertura del suelo resulta fundamental, dado que con frecuencia se la confunde con el concepto de uso del suelo, pese a tratarse de nociones distintas, aunque complementarias. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la cobertura del suelo se refiere a la cobertura (bio)física observable en la superficie terrestre, incluyendo la vegetación natural o implantada, los cuerpos de agua y los elementos antrópicos presentes. En contraste, el uso de la tierra describe los arreglos, actividades e insumos mediante los cuales la sociedad humana interviene sobre un determinado tipo de cobertura terrestre con el propósito de producirla, modificarla o mantenerla en el tiempo (Jansen & Di Gregorio, 2000).

Con el objetivo de superar las ambigüedades conceptuales y avanzar hacia la estandarización y armonización de la información, la FAO y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) desarrollaron el Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra (Land Cover Classification System, LCCS). Este sistema propone una clasificación de referencia universal, diseñada para responder a la necesidad de contar con datos comparables a distintas escalas espaciales y temporales, mediante un enfoque integrado que contempla la diversidad de situaciones inherentes a la cobertura terrestre. De este modo, el LCCS constituye una metodología exhaustiva y flexible, aplicable a cualquier región del mundo, que permite clasificar de manera consistente los distintos tipos de cobertura del suelo (FAO, 2000; Jansen & Di Gregorio, 2000). La clasificación es una representación abstracta de la situación real. Las clases de cobertura de la tierra se definen por una cadena de clasificadores que son combinaciones de un conjunto de atributos de diagnóstico independientes.

El sistema de clasificación de la cobertura de la tierra de FAO (LCCS) (Jansen & Di Gregorio, 2000) tiene dos fases principales:

- Fase inicial dicotómica: utilizan tres clasificadores: presencia de vegetación, condición edáfica y artificialidad de la cobertura, donde las distintas combinaciones de estos clasificadores permiten la descripción de ocho tipos principales de cobertura de la tierra: Áreas terrestres cultivadas y manejadas; Vegetación terrestre natural y seminatural; Áreas cultivadas acuáticas o regularmente inundadas; vegetación natural y seminatural acuática o regularmente inundada; superficies artificiales y áreas asociadas; Áreas descubiertas o suelo desnudo; Cuerpos artificiales de agua, nieve o hielo y Cuerpos naturales de agua, nieve y hielo.
- Fase modular jerárquica: donde la creación de las clases de cobertura se obtiene por combinación de un conjunto predefinido de clasificadores de cobertura de la tierra puros, los que a su vez se pueden combinar con los atributos y así lograr una mayor definición. Se distinguen dos tipos de atributos:
 - Atributos Medioambientales: influyen la cobertura de la tierra, pero no son inherentes a ella. (Ej. Clima, geoforma, altitud, suelos, litología, erosión)

- Atributos Técnico específicos: se refieren a la disciplina técnica. Es decir, para la vegetación se puede añadir el “Aspecto florístico”, para las Áreas cultivadas el “Tipo de cultivo”, para las Áreas descubiertas o desnudas el “Tipo de suelo”, etc.

De la aplicación de los conceptos formulados por el sistema de Clasificación de Cobertura de la Tierra de Jansen y Di Gregorio (2000), adaptados por el Proyecto Específico (PNECO1643) (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2009), quienes elaboraron una descripción de las categorías de Cobertura u Ocupación del Suelo de la República Argentina de acuerdo con el Sistema LCCS – FAO, se integró ésta a la base de datos geoespacial cartográfica de la cuenca A1, donde se definieron las coberturas correspondientes.

Las características de las diferentes coberturas de tierras según INTA (2009) en base de LCCS de Jansen y Di Gregorio (2000), presentes en la A1, como se representa en la Figura 4.20 y Tabla 4.10. se describe las como:

- Áreas urbanas: Son aquellas áreas con cobertura artificial como resultado de actividades humanas: construcciones, extracción o depósitos. La clasificación de las coberturas depende del aspecto superficial, en él se especifica si las superficies son construidas o no construidas. Las superficies construidas se caracterizan por la sustitución de la cobertura original con una cobertura artificial, frecuentemente impermeable. La densidad de las áreas urbanas en relación con las áreas circundantes se describe según el porcentaje de superficie cubierta con elementos impermeables. Se presenta usualmente en combinación con áreas vegetadas como jardines y áreas de recreación. Así, en la cuenca A1 se distinguieron 35 km² de Áreas urbanas con densidad media y 18 km² de áreas urbanas con baja densidad, que representa el 0,2 % y 0,1 % respectivamente del total del área de estudio. Como puede observarse las áreas urbanas tienen baja representación en la cuenca A1, siendo las subcuencas 2 y 5 las que presentan este tipo de cobertura.
- Cuerpos de agua: Esta cobertura se refiere a las áreas cubiertas por agua, debido a la construcción de reservorios, canales, lagunas artificiales, etc., y de no haberse realizado estas construcciones, el área no debería estar cubierta por agua. De acuerdo con la permanencia del agua en los sitios, los cuerpos de agua se pueden dividir en permanentes (cuando la duración es mayor a 9 meses), y no permanentes (cuando es menor a 9 meses). Como se desprende del análisis de la Figura 4.20 se distinguieron 756 km² de cuerpos de agua estacionario, de los cuales 366 km² se hallan en la subcuenca 2, 81 km² en la subcuenca 4, 75 km² en la subcuenca 3 y 55 km² en la subcuenca 5.
- Cultivo de herbáceas: Es una mezcla de distintas formas de vida (graminoides y no graminoides), que forman una capa continua de los dos elementos. Si la cobertura herbácea presenta graminoides en más de un 75 %, se define como vegetación graminoides. Lo mismo sucede para el caso no graminoides. En la cuenca A1, la cobertura alcanzó en el primer caso 7.373 km² (41,56 % del área total de la cuenca) y, en el segundo (cultivo de herbáceas No Graminoides) 7.036 km², que implica el 39,66 % del área de la cuenca. En síntesis, el 80 % de la cuenca A1 se encuentra cultivada por formas de vida graminoides y no graminoides. Del mismo modo, el cultivo de las graminoides se detecta en todas las subcuencas, encontrando que es el mayor valor de cobertura de la subcuenca 1, seguido de la subcuenca 4. En las no graminoides, la subcuenca con mayor representatividad de esta cobertura es la 2 y no se observa en la subcuenca 4.

- Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas / anegadas: Está representada por los pastizales en comunidades con coberturas abiertas a cerradas (> 15%), únicas o combinadas con otras formas de vida. Puede haber presencia de árboles y/o arbustos con cobertura dispersa (< 5 %). Esta cobertura en particular se encuentra en áreas (semi) permanentemente inundadas o anegadas, por más de 4 meses al año, periodo de tiempo, que no necesariamente está ligado a una estación climática. Ej: pajonales, camalotales, embalsados, gramillares, etc. Dentro de este tipo de cobertura se describieron 2.034 km², que representan el 11,47 % de la cuenca A1. La distribución en las subcuencas es bastante dispar, siendo la subcuenca 1 la que presenta la mayor distribución de esta cobertura con 1.465 km², seguida de la subcuenca 2 con 319 km², la subcuenca 4 con 156 km², la subcuenca 3 con 81 km² y finalmente la cuenca 5 con 11 km².
- Pastizal abierto: Es una cobertura similar al pastizal cerrado con la diferencia que las graminiformes conforman comunidades con coberturas abiertas (del 65-15%), únicas o combinadas con otras formas de vida y, al igual que en el cerrado, los árboles y/o arbustos pueden estar presentes, pero sólo con cobertura dispersa (<15%), hallándose en el área de estudio un total de 297 km², los cuales se detectaron en la subcuenca 4
- Pastizal cerrado: Se denomina así cuando las formas graminiformes se presentan en comunidades con coberturas cerradas únicas (>65%) o combinadas con otras formas de vida. Los árboles y/o arbustos pueden estar presentes con cobertura dispersa, es decir inferior al 15%. En la cuenca se identificaron 189 km² de este tipo de cobertura, que significan el 1,07% del total de la cuenca. El pastizal cerrado se detectó mayormente en la subcuenca 1 (143 km²) y en menor medida en la subcuenca 4 (43 km²).

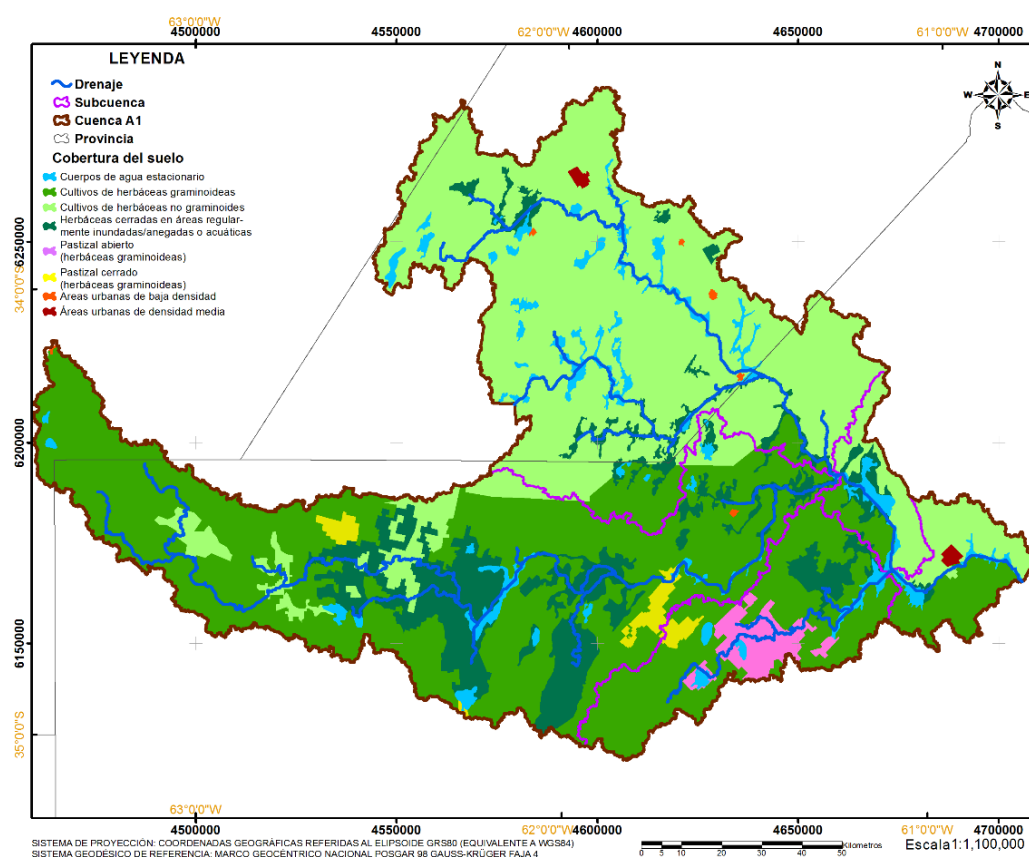


Figura 4.20 Coberturas de Tierra según clasificación LCCS. Fuente: Adaptado de Jansen y Di Gregorio (2000).

La síntesis, la distribución de las coberturas del suelo en el área de estudio (Figura 4.20) evidencia un claro predominio de superficies destinadas a cultivos de herbáceas, tanto graminoides como no graminoides, que en conjunto representan más del 80 % de la superficie total, lo que refleja un uso intensivo del territorio con implicancias directas sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca. Este tipo de cobertura, dependiendo del estado fenológico y de las prácticas de manejo asociadas, puede favorecer una mayor escorrentía superficial y una reducción de la infiltración, especialmente durante períodos de suelo desnudo. Las herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas o anegadas, que ocupan el 11,47 %, constituyen sectores clave para la regulación hídrica, actuando como áreas de almacenamiento temporario del agua, atenuando picos de escorrentía y favoreciendo procesos de sedimentación. Los cuerpos de agua estacionarios, que representan el 4,26 %, cumplen un rol fundamental en la dinámica hidrológica local, funcionando como reservorios naturales y reguladores del balance hídrico superficial. Por su parte, los pastizales abiertos y cerrados, aunque de menor extensión relativa, contribuyen a mejorar la infiltración y a reducir los procesos erosivos debido a la cobertura vegetal permanente. Finalmente, las áreas urbanas, que en conjunto no superan el 0,3 % de la superficie, presentan una influencia hidrológica localizada pero significativa, asociada al aumento de superficies impermeables y a la generación de escorrentía rápida.

Tabla 4.10. Superficie de ocupación porcentual de las clases de cobertura por subcuenca.

Cobertura de suelo	Ocupación en superficie por subcuenca (%)				
	1	2	3	4	5
Áreas urbanas de baja densidad	0,04%	0,06%			
Áreas urbanas de densidad media		0,10%			0,10%
Cuerpos de agua estacionario	1,00%	2,07%	0,42%	0,46%	0,31%
Cultivos de herbáceas graminoides	28,90%	1,87%	0,80%	7,99%	2,01%
Cultivos de herbáceas no graminoides	3,72%	32,24%	1,69%		2,01%
Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	8,26%	1,80%	0,46%	0,88%	0,07%
Pastizal abierto (herbáceas graminoides)				1,68%	
Pastizal cerrado (herbáceas graminoides)	0,83%			0,24%	

4.8 Uso del suelo

El uso del suelo, además, puede caracterizarse según sus particularidades en relación con el suelo / paisaje. En la Figura 4.21 se presenta la zonificación del uso del suelo planteada por INTA (Volante, 2009), la cual fue adaptada por procesamiento geoespacial para la cuenca A1, para analizar variabilidad y superficie de ocupación, desglosada para las subcuencas (Tabla 4.11). Cada categoría de uso del suelo presenta una descripción particular, que indica las características detectadas según:

- Bañados: Los usos de suelo que corresponden a esta descripción corresponden a terrenos anegados que contienen agua durante todo el año. En esta zona el piso es generalmente fangoso, pantanoso o cenagoso, cubierto de agua de poca profundidad, proveniente del desborde de un lago, río o arroyo. En la cuenca A1 se observaron 4.818 km² de bañados. Las superficies ocupadas por este uso a nivel subcuenca, en orden decreciente, son la 1 (2.233 km²), la 4 (1.226 km²), la 2 (865 km²), la 5 (278 km²) y la 3 (213 km²).
- Cañadas: Son terrenos bajos, con una forma alargada, pueden tener o no un curso de agua, y se encuentran cubiertas de vegetación propia de zonas húmedas (pajonales). Se identificaron 319

km² con este tipo de uso de suelo en la cuenca, de los cuales el 85 % se encuentran distribuidas en las subcuencas 1 (121 km²) y 2 (152 km²).

- Espejos de agua: En esta definición se toma en consideración aquellas superficies cubiertas con agua de origen natural o artificial que ocupan una zona amplia del terreno, en las que se incluyen los ríos de doble margen. Los espejos de agua en la cuenca ocupan 923 km², distribuidos principalmente en las subcuencas 1 con 426 km², 2 con 266 km² y 4 con 134 km².
- Paleocauce o cauce abandonado: Corresponde a una zona antigua de cauce de agua desactivada en forma parcial o total que, con determinadas condiciones climáticas puede o no tener agua, de modo que puede transformarse en una zona inundada y pantanosa. En la cuenca se observaron 66 km² de paleocauces, la mitad de éstos se hallaron en la subcuenca 2.
- Plantaciones perennes: Esta superficie corresponde con áreas cubiertas por siembra sistemática de vegetación persistente. En la cuenca A1 se observaron 456 km² de plantaciones perennes. Las superficies ocupadas por este uso a nivel subcuenca, en orden decreciente, son la 1 (310 km²), la 4 (122 km²), la 2 (15 km²) y la 3 (7 km²).
- Bosque artificial: La definición correspondiente a este uso de suelo se relaciona a un terreno cubierto de árboles plantados por el hombre, cualquiera sea su destino y clasificación industrial (frutales, para sombra, para madera, etc.). En la cuenca A1 la superficie total ocupada por el bosque artificial es 151 km², en las que más de las dos terceras partes se encuentran en la subcuenca 2 (129 km²).
- Uso de tierras mixto: Son áreas con variados cultivos como cereales, pasturas y silvicultura alternados. Es un uso de suelo muy extensivo en la cuenca abarcando 10.930 km², con 5.267 km² en la subcuenca 2, 4460 km² en la subcuenca 1, 477 km² en la subcuenca 4, 423 km² en la subcuenca 5 y 301 km² en la subcuenca 3.
- Planta urbana: El uso denominado así concierne a una zona edificada con fines urbanísticos destinados a actividades antrópicas. Las plantas urbanas ubicadas en la cuenca se corresponden con una superficie de 77 km² en total, de las cuales la mitad de ellas se encuentran en la subcuenca 2 (36 km²), y el resto se distribuye principalmente en las subcuencas 5 (17 km²) y 1 (15 km²).

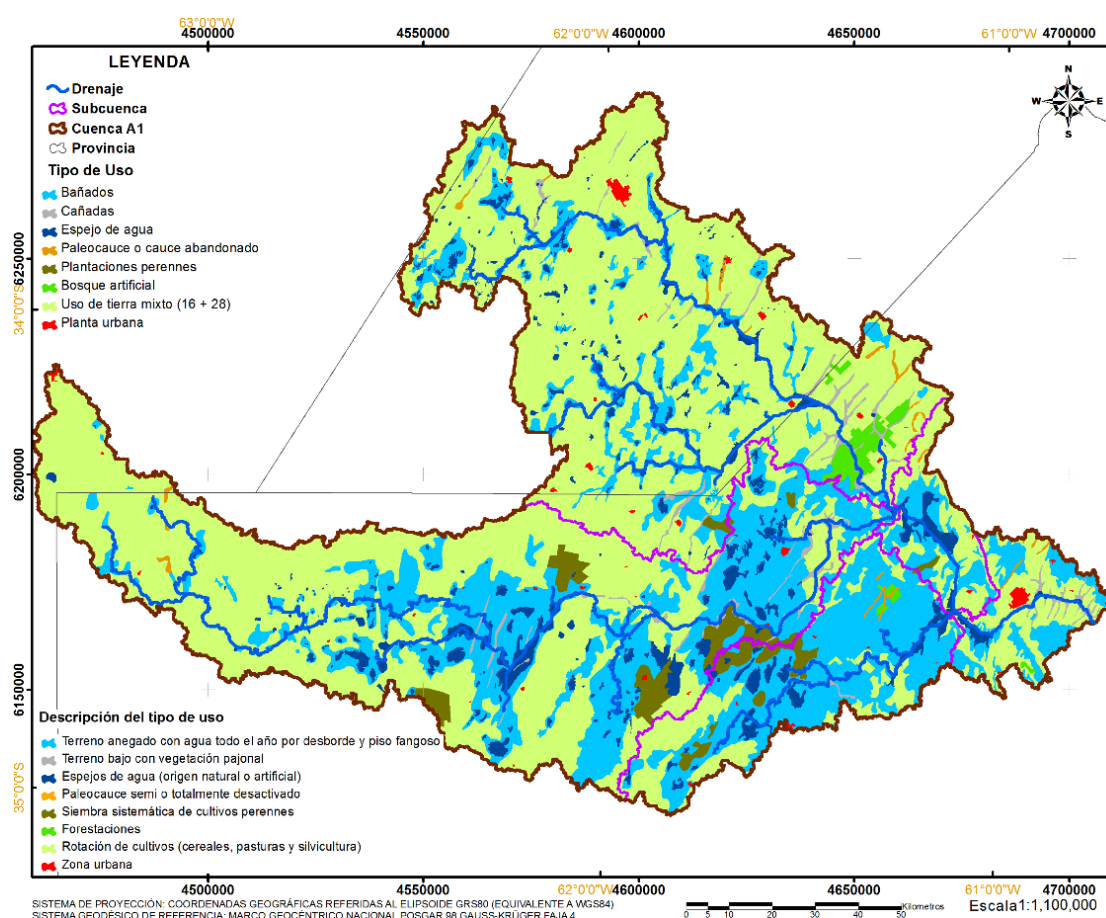


Figura 4.21 Zonificación del uso del suelo del área de estudio. Fuente: Adaptado de Volante (2009)

Tabla 4.11. Superficie de ocupación de uso de suelo por subcuenca.

Uso del suelo INTA	Ocupación en superficie por subcuenca (%)				
	1	2	3	4	5
Bañados	12,59%	4,88%	1,20%	6,91%	1,57%
Bosque artificial	0,02%	0,73%		0,08%	0,03%
Cañadas	0,68%	0,86%		0,03%	0,23%
Espejo de agua	2,40%	1,50%	0,41%	0,76%	0,14%
Paleocauce o cauce abandonado	0,07%	0,19%	0,01%	0,06%	0,04%
Planta urbana	0,09%	0,21%	0,01%	0,03%	0,10%
Plantaciones perennes	1,75%	0,09%	0,04%	0,69%	
Uso de tierra mixto	25,14%	29,69%	1,70%	2,69%	2,39%

4.9 Ecorregiones

Se define como ecorregiones a aquellas áreas ecológicamente distintivas que resultan de la combinación e interrelación de factores geológicos, geomorfológicos, edáficos, climáticos, de vegetación, uso de la tierra y ocupación humana de la misma (Wiken,1986).

Según Brown *et al.* (2006) estas regiones ecológicas son áreas relativamente homogéneas que tienen en común un gran número de especies y condiciones ambientales que ponen en evidencia los principales procesos ecológicos, que hacen al mantenimiento de la biodiversidad y los servicios que proporcionan los ecosistemas naturales. Son un nivel de organización apropiado para conservar especies, ecosistemas y funciones, incluso se pueden encontrar características propias desde el punto de vista sociocultural.

Burkart *et al.* (1999) dividieron Argentina en dieciocho ecorregiones. Posteriormente, Pereyra (2003) delimita y define las ecorregiones, en base a esquemas espaciales considerando áreas donde los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas exhiben patrones determinados y distintivos e incorporando el criterio de regiones morfoestructurales y de provincia geológica. El objetivo del mapa de ecorregiones así obtenido fue constituir un mapa base para posteriores estudios para el conocimiento físico del territorio, evaluar los recursos naturales y el impacto del potencial deterioro debido a acciones humanas, representando una síntesis de las características de los ecosistemas. La metodología de análisis consideró un conjunto de factores ambientales, independientemente del nivel de resolución de cada uno, sin establecer *a priori* una categorización de los factores en función de su potencial predominio al realizar la regionalización. El motivo de trabajar con una aproximación no jerárquica está dado por la variación de un factor entre una y otra región e incluso en una misma región. En líneas generales, los factores más relevantes para la delimitación de ecorregiones son los datos climáticos (precipitaciones y temperaturas estacionales y anuales, evapotranspiración, precipitaciones níveas y circulación de vientos), fisiográficos (topografías, geoformas, relieve local, irregularidad del terreno, elevación), geológicos (litología aflorante y subsuperficial, estructura y tectónica), edáficos (suelos, regímenes de humedad y temperatura de los suelos, grado de desarrollo y distribución en el paisaje), vegetación (tipo de vegetación y principales especies y géneros presentes, grado de cobertura) y datos hidrológicos.

Se clasificaron las ecorregiones respecto de las características del paisaje, que reflejan los aspectos morfoclimáticos y climáticos en general, y de los aspectos morfoestructurales, resultando unidades diferenciadas comparables ambientalmente, e internamente, en cada una de ellas. Para establecer los límites entre unidades se adoptó un criterio que considerara la mayor cantidad posible de cambios de las variables. El nombre asignado a cada unidad incluye una parte que referencia alguna característica del relieve de la ecorregión y por otra parte que haga referencia a algún aspecto de localización geográfica para facilitar su ubicación en el mapa.

Según la cartografía de Burkart *et al.* (1999), el área en estudio (cuenca A1) corresponde a la ecorregión pampa húmeda que, de acuerdo con su descripción, fue originada por relleno sedimentario de la fosa de hundimiento tectónico. Los sedimentos superficiales son de origen continental, a partir de procesos eólicos, con una gradación granulométrica que va desde textura arenosa al SO a limo arcillosa al NE. El clima es templado húmedo a subhúmedo con precipitaciones a lo largo del año entre 600 mm (SO) a 1100 mm (NE). El clima húmedo de la región junto a las características geoquímicas de los materiales sedimentarios y los ciclos vegetativos del pastizal favorecieron el desarrollo de los que presentan un alto contenido de materia orgánica, nutrientes y horizontes subsuperficiales arcillosos, evidenciando una excelente aptitud agrícola, con limitaciones locales. La formación vegetal original característica de la región es el pastizal templado con la comunidad de flechillares. Existen limitaciones edáficas y geomorfológicas que modificaron esta comunidad por otras de pastizales halófilos, pajonales diversos y pastizales de médanos.

Las ecorregiones en la cuenca A1 se agrupan en la unidad D, que corresponde a la unidad pampa, subdividida en 3 ecorregiones la pampa arenosa (D27) que ocupa 52% de la superficie, la pampa endorreica (D28) con 47% de ocupación y la pampa ondulada (D30) sólo el 1% de la cuenca. Discriminando las ecorregiones presentes en las subcuencas que conforman la cuenca A1, se puede observar la superficie que ocupa cada una de ellas, comprobando que la ecorregión D27 (pampa arenosa) se encuentra representada en todas las subcuencas del área de estudio (Tabla 4.12)

Tabla 4.12. Superficie de las ecorregiones presentes en el área de estudio.

Subcuenca	Ecorregión	Porcentaje de ocupación
1	D27	26,6%
	D28	16,1%
2	D27	5,8%
	D28	31,2%
	D30	1,1%
3	D27	3,4%
4	D27	11,3%
5	D27	4,5%

A continuación, se presenta una síntesis descriptiva de las características de las ecorregiones según Pereyra (2003) de la cuenca A1, integrando las variables mencionadas anteriormente, en el desarrollo del presente capítulo de tesis.

○ D27: Pampa arenosa

- *Características del paisaje:* Geomorfológicamente, el paisaje ha sido modelado predominantemente por erosión eólica y parcialmente por erosión fluvial, hallándose como geoformas, dunas de distintos tipos según la actividad eólica. Así, hacia el sur de la cuenca se observan dunas longitudinales con rumbo NNE-SSO, separadas entre sí por depresiones alargadas, que se inundan periódicamente. En el S. se encuentran dunas transversales y crestas barjanoides. Poseen una red de drenaje mal integrada, con escasos cursos fluviales, alta permeabilidad y actividad eólica reciente.
- *Geología:* Los sedimentos más antiguos hallados aquí son del Pleistoceno, cubiertos por sedimentos limosos de tipo loessico, “sedimentos pampeanos: Ensenadense y Bonaerense”, sobre los que se encuentran depósitos arenosos de origen eólico, del pleistoceno superior conocidos como médano invasor o Formación Junín. En los valles fluviales se hallan sedimentos fluviales limo arenosos holocenos (Formación Luján).
- *Clima:* La clasificación climática que le corresponde a esta unidad es de tipo Mesotermal húmedo Cfw’a (h) y Cwa (k). El valor medio de las temperaturas anuales es superior a 18°C, con precipitaciones anuales superiores a los 800 mm. La evapotranspiración potencial es de 800 mm, con lo que se observa un déficit hídrico de 100 mm. En invierno hay heladas frecuentes y hacia el oeste aumentan la estacionalidad climática, las condiciones de aridez y continentalidad climática (Tipo climático Bskw (a))
- *Vegetación:* La vegetación predominante es la estepa o pseudoestepa de gramíneas, pudiéndose hallar, si las condiciones edáficas o la disponibilidad hídrica lo permite, praderas de gramíneas, estepas samnófilas y halófilas, matorrales, comunidades hidrófilas como

pajonales y juncuales. Predominan las gramíneas *Stipa neesiana*, *S. tenuissima*, *Poa lanígera*, *Eragrostis cilianensis*, *Melica brasiliana*, *Piptochaetium montevidense*, *Panicum bergii*, etc., con arbustos de *Baccharis coridifolia*, *Baccharis articulata*, etc. En suelos alcalinos se desarrolla *Distichlis spicata*, *Puccinellia glaucescens*, *Juncus acutus*, *Scirpus americanus*, entre otros. En los lugares con sustrato arenoso se observa *Elionorus muticus*, *Poa lanuginosa* y *Panicum racemosum* y en lagunas es característico *Scirpus californicus*.

- *Suelos*: Los suelos pertenecen en su mayoría al Molisol, con un horizonte superficial potente, blanco, abundante materia orgánica y elevada saturación con bases (mólico). Los dominantes tienen perfiles poco diferenciados y bajo desarrollo pedogenético constituyendo Haplustoles o *Hapludoles*, según si el régimen de humedad es ústico o údico respectivamente. En el primer caso, los suelos tienen perfiles afectados por lluvias estacionales (estivales en este caso) y en el segundo, de régimen údico, los suelos presentan humedad la mayor parte del año. Los *Argiudoles* y *Natralboles*, con otros tipos de *Molisoles* con menor representatividad areal.
- D28: Pampa endorreica
- *Localización*: Esta ecorregión se desarrolla en una pequeña zona al sur de Córdoba, NO de Buenos Aires y S de Santa Fe.
 - *Características del paisaje*: la erosión eólica y el proceso fluvial conformaron el paisaje de la región. Así, la deposición loésica recurrente formó la planicie loésica sobre la que se observa formaciones de niveles de agradación pedemontana, de relieve suave e inclinación baja hacia el Este. Los ríos cuarto y Quinto, al NO de la cuenca, colectan las aguas de las sierras en Córdoba los que aparentemente, se integraban a la red del Río Salado, pero fluctuaciones climáticas (mayor aridez) y posibles movimientos tectónicos interfirieron en el desarrollo de la red de drenaje, abandonándolo y obstruyéndose. Por este motivo, la red de drenaje presenta pobre integración y la mayoría de los cursos serranos se insumen en la planicie. Las lagunas son frecuentes. El drenaje de la zona se complicó más debido a la migración de dunas longitudinales y transversales desde la Pampa Arenosa en el Holoceno tardío
 - *Geología*: Pertenece a la Provincia geológica de la Llanura chaco-Pampeana con afloramientos de origen Pleistocénico, cubiertos por sedimentos limosos de tipo loésico, “sedimentos pampeanos”, sobre los que se depositan sedimentos arenosos de origen eólico, del pleistoceno superior –holoceno (médano invasor o Formación Junín). En los valles fluviales se hallan sedimentos fluviales limo arenosos holocenos (Formación Luján). En las zonas deprimidas total o parcialmente anegadas, aparecen sedimentos limosos y arcillosos ricos en materia orgánica en algunos casos.
 - *Clima*: La clasificación climática que le corresponde a esta unidad es de tipo Mesotermal húmedo Cfw’a (h) y Cwa (k). El valor medio de las temperaturas anuales es superior a 18°C, con precipitaciones anuales superiores a los 900 mm, tormentas poco frecuentes y humedad relativa superior al 60%. La evapotranspiración potencial es de 850 mm, con leve a nulo déficit hídrico (100 mm). En invierno heladas frecuentes y hacia el oeste aumentan las condiciones de aridez y continentalidad climática pasando al tipo climático Bskw (a).
 - *Vegetación*: las comunidades originales desaparecieron en pos del avance de las prácticas agrícolas, quedando relegadas a espacios relictuales. La fisonomía preponderante es la estepa

de gramíneas, con numerosas especies invasoras introducidas, algunas de las cuales son importantes para el ganado. Entre las especies que definían a esta unidad se cita *Poa ligularis*, *Stipa tenuissima*, *S. trichotoma*, *S. neesiana*, *Eragrostis lugens*, *Bromus brevis*, etc. En forma dispersa se encuentran arbustos como *Discaria longispina* y *Baccharis articulata*, entre otros.

- **Suelos:** Los suelos mayormente corresponden al orden de los *Molisoles*, con un horizonte superficial potente, blando, con abundante materia orgánica y elevada saturación con bases (mólico). Los dominantes tienen perfiles poco diferenciados y bajo desarrollo pedogenético y constituyen *Haplustoles* o *Hapludoles*, según el régimen de humedad sea ústico o údico respectivamente. Otros Molisoles con menor representatividad areal son los *Argiudoles* (con un horizonte subsuperficial enriquecido con arcillas aluviales – Bt argílico) y *Natralboles* (suelos ricos en sodio – Bt nítrico).

○ D30: Pampa ondulada

- **Localización:** Ocupa una pequeña fracción en el sector NO de la provincia de Buenos Aires con una breve ingresión en el SE de la provincia de Santa Fe, ocupando unos 200 km², representada solo en la subcuenca 2 del área de estudio.
- **Características del paisaje:** Presenta un relieve suavemente ondulado, con cotas entre 5 a 50 msnm y bajo relieve acumulativo que aumenta hacia el NO. Se originó por deflación y acumulación eólica de sedimentos limosos de tipo loésico durante el Neogeno de la Región Pampeana. En períodos más secos se depositaron materiales limosos en eventos episódicos, transportados como tormentas de polvo y depositados por decantación, con lo que obliteraron el relieve preexistente. La planicie loésica se halla disectada por varios cursos fluviales con un diseño subdendrítico a paralelo evidenciando la existencia de control estructural ejercido por rocas antiguas no aflorantes.
- **Geología:** Geológicamente se encuentra en la provincia Chaco – Pampeana. El basamento cristalino (Cratón del Río de la Plata) se encuentra a distintas profundidades, sin afloramientos de rocas pre-cuaternarias. En las divisorias más elevadas se observan sedimentos loésicos pampeanos: formación Buenos Aires (pleistoceno inferior a superior) y, en forma localizada sedimentos limosos de la Formación ensenada. Predominan sedimentos limosos y arenosos fluviales de las distintas facies de la Formación Luján. Todos estos depósitos se encuentran cubiertos por depósitos fluviales recientes y actuales, depósitos finos lacustres y palustres y depósitos de arenas eólicas.
- **Clima:** La unidad corresponde a un tipo Mesotermal húmedo Cfw'a (h), con temperaturas medias anuales superiores a 18°C. Las precipitaciones anuales son del orden de 1100 – 1200 mm con valores mayores en los meses de verano. Frecuentes tormentas y humedad relativa en general superior al 70%. Evapotranspiración potencial de 800 mm y heladas poco frecuentes.
- **Vegetación:** Predomina la fisonomía de praderas, en especial de gramíneas, cuyas especies dominantes son *Stipa neesiana*, *S. tenuissima*, *Poa lanígera*, *Eragrostis cilianensis*, *Melica brasiliana*, etc. En el extremo occidental se encuentran comunidades de *Distichlis spicata*, *Hordeum pusillum*, *Puccinellia glaucescens*, *Heliotropium curassavicum*, etc. *Paspalum vaginatum* forma estepas de gramilla.

- **Suelos:** Desde el punto de vista agrícola es una zona de productividad alta, con suelos naturalmente fértiles y con un alto porcentaje de humedad údico. Los procesos pedogenéticos predominantes son la humificación/melanización y argiluvación. Aquí dominan los *Molisoles* con un horizonte superficial A blando, potente, abundante materia orgánica y elevada saturación con bases (mólico).

En la Figura 4.22 se observa la zonificación de las ecorregiones presentes en la cuenca A1 del Río Salado.

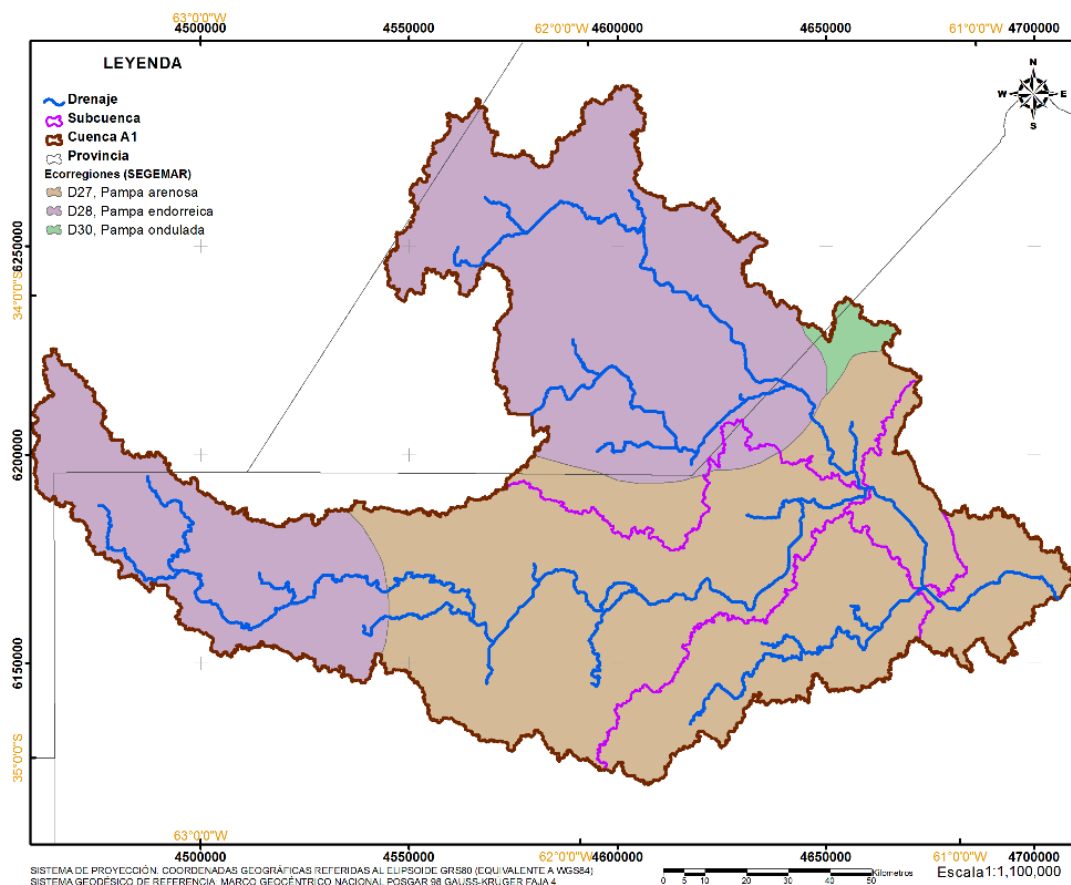


Figura 4.22 Ecorregiones presentes en la cuenca A1 del Río Salado. Fuente: Adaptado de Pereyra (2003).

4.10 Bibliografía

- Bianchi, A. R., & Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. Ediciones INTA. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/16040>
- Bogaart, P. W., & Troch, P. A. (2006). Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 925–936. <https://doi.org/10.5194/hess-10-925-2006>
- Bracken, L. J., Wainwright, J., Ali, G. A., Tetzlaff, D., Smith, M. W., Reaney, S. M., & Roy, A. G. (2013). Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>

- Brown, A. D., Martínez Ortiz, U., Acerbi, M., & Corcuera, J. (Eds.). (2006). *La situación ambiental argentina 2005*. Fundación Vida Silvestre Argentina.
https://d2qv5f444n933g.cloudfront.net/downloads/situacion_ambiental_argentina_2005.pdf
- Burkart, R., Bárbaro, N. O., Sánchez, R. O., & Gómez, D. A. (1999). *Eco-regiones de la Argentina*. Administración de Parques Nacionales, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Programa de Desarrollo Institucional Ambiental. https://sib.gob.ar/archivos/Eco-Regiones_de_la_Argentina.pdf
- Cabrera, A. L. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas (Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería; Tomo 2 fasc. 1). Acme.
<https://archive.org/details/RegionesFitogeograficasArgentinasACabreraEncArgDeAgrYJardFas1T2ACME1976>
- Casas, R. R., & Albarracín, G. F. (Eds.). (2015). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina* (Tomos 1-2). Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
https://www.researchgate.net/publication/288808015_El_deterioro_del_suelo_y_del_ambiente_en_la_Argentina_Tomo_2_Provincia_de_Misiones
- Cruzate, G., Gómez, L., Pizarro, M. J., Mercuri, P., & Banchemo, S. (2013). *Suelos de la República Argentina* (Versión 9.0) [Conjunto de datos geoespaciales]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. Escala 1:500.000. <https://geo-backend.inta.gob.ar/catalogue/#/dataset/230>
- Etchevehere, P. H. (1976). *Normas de reconocimiento de suelos*. Departamento de Suelos, INTA, Publicación N° 152. <https://koha.fca.unju.edu.ar/bib/21488>
- Fan, Y., Clark, M., Lawrence, D. M., Swenson, S., Band, L. E., Brantley, S. L., Brooks, P. D., Dietrich, W. E., Flores, A., Grant, G., Kirchner, J. W., Mackay, D. S., McDonnell, J. J., Milly, P. C. D., Sullivan, P. L., Tague, C., Ajami, H., Chaney, N., Hartmann, A., ... Yamazaki, D. (2019). Hillslope hydrology in global change research and Earth system modeling. *Water Resources Research*, 55(2), 1737-1772.
<https://doi.org/10.1029/2018WR023903>
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & de Antueno, L. (2025). *Contribuciones al manejo integral de cuencas hidrográficas. Herramientas y procedimientos básicos a campo y en gabinete*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/184639>
- Hallema, D. W., Moussa, R., Sun, G., & McNulty, S. G. (2016). Surface storm flow prediction on hillslopes based on topography and hydrologic connectivity. *Ecological Processes*, 5, Artículo 13.
<https://doi.org/10.1186/s13717-016-0057-1>
- Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (s.f.). *Capas SIG: Base de Datos Geoespacial Institucional* [Conjunto de datos geoespaciales] (recuperado el 15 de noviembre de 2019).
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC]. (2024). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Región Metropolitana Buenos Aires: Ciudad Autónoma de Buenos Aires y 39 partidos de la provincia de Buenos Aires*. <https://censo.gob.ar/index.php/region-metropolitana-buenos-aires/>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. (2009). *Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir de sensores remotos. Proyecto Específico (PNECO1643). Informe Técnico Unificado (Anexo II). Descripción de las categorías de Cobertura u Ocupación del Suelo de la República Argentina de acuerdo con el Sistema "Land Cover Classification System – FAO"*.

https://www.researchgate.net/publication/278962502_Monitoreo_de_la_Cobertura_y_el_Uso_del_Suelo_a_partir_de_sensores_remotos

Jahn, R., Blume, H.-P., Asio, V. B., Spaargaren, O., & Schad, P. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO].

<https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>

Jansen, L., & Di Gregorio, A. (2000). *Land cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO].

https://www.fao.org/4/x0596e/x0596e01f.htm#p357_35400

Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021). Evaluación de variables hidrológicas aplicando un modelo automatizado con sistemas de información geográfica (GeoQ), para una cuenca de llanura bonaerense, Argentina. En *III Congreso Virtual Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales "El Ambiente, los problemas ambientales y la Pos-pandemia"*, La Paz, Bolivia.

<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/189316>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/>

Pereyra, F. X. (2003). *Ecorregiones de la Argentina* (Anales 37). Servicio Geológico Minero Argentino.

<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2953>

Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3ª ed.). Mundi-Prensa. <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000028853>

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [SAGyP-INTA]. (1989). *Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires* (Escala 1:500.000) [Proyecto PNUD ARG/85/019]. <https://searchworks.stanford.edu/view/2116475> -

<https://catalogo.uns.edu.ar/vufind/Record/EEA.libagro010835>

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [SAGyP-INTA]. (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina* (Escala 1:500.000 y 1:1.000.000) [Proyecto PNUD Arg-85/019].

Talebi, A. (2008). *The relation between geometry, hydrology and stability of complex hillslopes examined using low-dimensional hydrological models* [Tesis doctoral, Wageningen University & Research]. <https://doi.org/10.18174/39077>

U.S. Department of Agriculture, Soil Survey Staff [USDA]. (1960). *Soil classification: A comprehensive system* (7th Approximation). U.S. Government Printing Office.

U.S. Department of Agriculture, Soil Survey Staff [USDA]. (1999). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2nd ed., Agriculture Handbook Number 436).

U.S. Government Printing Office. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>

Volante, J. N. (Coord.). (2009). *Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir de sensores remotos. Proyecto Específico PNECO1643, Resultados 2006-2009 (Informe Técnico Unificado)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA].

https://www.researchgate.net/publication/278962502_Monitoreo_de_la_Cobertura_y_el_Uso_del_Suelo_a_partir_de_sensores_remotos

Wiken, E. (1986). *Terrestrial ecozones of Canada* (Ecological Land Classification Series No. 19). Environment Canada.

https://www.researchgate.net/publication/237131929_Terrestrial_EcoZones_of_Canada

5 ANÁLISIS MULTITEMPORAL PLUVIAL Y DE ZONAS INUNDABLES EN EL NOROESTE BONAERENSE. ARGENTINA.¹²

5.1 Introducción

La alternancia de períodos húmedos y secos constituye una característica intrínseca del régimen climático de la región pampeana, documentada extensamente en la literatura regional (Forte Lay *et al.*, 2008; Scarpati & Capriolo, 2013). Esta variabilidad climática ejerce una influencia directa sobre la dinámica hidrológica superficial, particularmente en cuencas de llanura donde la baja pendiente favorece la acumulación de excedentes hídricos durante los períodos húmedos.

La dinámica temporal y espacial de una cuenca hidrográfica es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación, al igual que está íntimamente ligado a la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Gaspari *et al.*, 2010). La cuenca funciona hidrológicamente como un colector que recibe la precipitación y convierte, parte de ésta, en escurrimiento. Las condiciones climáticas y las características físicas particulares de la cuenca son las que determinan este funcionamiento e influyen en la descripción de la dinámica del ciclo hidrológico.

Los modelos hidrológicos son una herramienta útil para la evaluación y análisis de los recursos hídricos y su funcionamiento. Constan de entradas y salidas que consisten en variables hidrológicas mensurables conectadas por medio de ecuaciones (Chow *et al.*, 1994). Al ser una representación de la realidad, se debe definir de manera clara el objetivo para el cual es aplicado, la exactitud de la respuesta a las simulaciones y las variables de entrada que utiliza (según disponibilidad de base datos, costo y tiempo para su relevamiento), como ser información satelital.

Las inundaciones se encuentran entre los desastres naturales de mayor rango en términos de costo anual en pérdidas aseguradas y no aseguradas. Dado que los eventos de alto impacto a menudo cubren escalas espaciales que están más allá de las operaciones de monitoreo regional tradicionales, la detección remota, en particular desde los satélites, presenta un enfoque atractivo (Schumann *et al.*, 2018). Esta tecnología permite que las mediciones se obtengan en escalas espaciales mucho más grandes de lo que pueden ser cubiertas por instrumentos y métodos basados en el campo. Para fenómenos a gran escala, como las inundaciones, esto es particularmente atractivo y durante aproximadamente cuatro décadas, los datos satelitales de inundaciones se han utilizado para obtener información sobre inundaciones en diversas escalas espaciales y temporales, generalmente en forma de área inundada. La posición de la costa de inundación máxima es la variable principal para determinar la extensión del peligro de inundación (Schumann *et al.*, 2018).

El Observatorio de Inundaciones de Dartmouth (DFO, <http://floodobservatory.colorado.edu>) rastrea, monitorea y archiva eventos de inundaciones a nivel mundial desde 1985 y hace que los datos estén disponibles al público en varios formatos, incluidos gráficos, hojas de cálculo y mapas SIG (DFO, 1993). Desde 2011, el DFO ha colaborado con la NASA en la distribución de mapas de inundaciones casi en tiempo real (NRT) a partir de imágenes satelitales, principalmente MODIS a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA. El DFO también archiva esta información. Además, durante desastres de gran

¹² Publicado en: Montealegre Medina, F.A.; Gaspari, F.J. & M.I. Delgado. 2019. Análisis multitemporal de zonas inundables en el NO bonaerense. Argentina. Congreso Virtual: Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales. "Pensando alternativas para el abordaje ambiental". La Paz, Bolivia. ISSN: 978-99905-809-7-6. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/189318>

impacto, el DFO mapea inundaciones de otros satélites, como la serie Landsat y las misiones satelitales SAR, y agrega estos productos a varios formatos de mapas que ayudan a los equipos de respuesta a las inundaciones a través de la conciencia situacional realizando coberturas a gran escala (Schumann *et al.*, 2018). Más recientemente, el DFO ha implementado un protocolo de servicio geoespacial abierto, configurando un servicio de mapas web (WMS) a través del cual los clientes de SIG pueden adquirir los últimos productos relacionados con inundaciones.

El problema de las inundaciones bonaerenses, en la región pampeana argentina, merece una atención especial. Las variaciones en las precipitaciones que se han producido en las últimas décadas generan modificaciones en el régimen hidrológico, produciendo significativos ascensos en los niveles freáticos y la aparición de variadas e innumerables áreas anegadas, de diverso grado y frecuencia. Durante los últimos sesenta años, ha estado expuesta a una creciente intervención humana, marcada por un aumento considerable en la proporción de la superficie cultivada.

La provincia de Buenos Aires es una de las regiones más fértiles y productivas de Argentina. Debido a sus características naturales, la agricultura y ganadería se han desarrollado tradicionalmente con bajo uso de insumos desde mediados del siglo XIX, pero prácticamente sin reposición de los elementos nutricionales extraídos. La producción y explotación agrícola ganadera en conjunción con condiciones naturales de ciertos suelos y clima de la región pampeana ondulada habrían provocado la acidificación en mayor o en menor medida, y en algunos casos llegar a comprometer la posibilidad de crecimiento de ciertas especies vegetales.

La capacidad productiva de los suelos de la cuenca del río Salado permitió que los pastizales pampeanos se sustituyeran por agroecosistemas, evidenciando un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación. La actividad productiva de la cuenca es predominantemente agropecuaria; los recursos naturales directamente vinculados con esta producción que resultaron más afectados fueron los suelos y el agua (MOSP, 1999). Entre las amenazas encontradas a las que está sometido el sistema natural bonaerense se aprecia, en la región noroccidental y en la zona deprimida del río Salado (región pampeana deprimida), la ocurrencia de las inundaciones de carácter areal y de extensa permanencia temporal. Esta problemática está condicionada a la variabilidad climática y por la topografía que expresa: áreas llanas y deprimidas. La topografía es un determinante importante de la distribución espacial de la humedad del suelo, debido a que las zonas que tienden a acumular mayor cantidad de agua son aquellas que presentan altos contenidos de humedad.

En la cuenca del río Salado predominan los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) sobre el escurrimiento superficial, razón por la cual las inundaciones son frecuentes, periódicas y prolongadas. Este comportamiento se acentuó en las últimas tres décadas, al iniciarse un período más húmedo con mayor frecuencia de los eventos que afectan en forma generalizada la región del Salado. Las consecuencias representaron pérdidas de gran magnitud en la producción del sector agropecuario y la infraestructura vial y urbana, al igual que en el sector rural (MOSP, 1999). Ello hace que al producirse precipitaciones el agua no tienda a escurrir por la superficie, sino que predominen los movimientos verticales, como son la filtración a través del suelo, evaporación y transpiración (Kruse & Ainchil, 2017).

El objetivo fue realizar un análisis multitemporal satelital de zonas inundadas de la cuenca A1 del río Salado.

5.2 Materiales y métodos

El análisis multitemporal de zonas inundadas se realizó con los datos obtenidos por el DFO, los cuales se encuentran disponibles en la página web: <http://floodobservatory.colorado.edu/GlobalFloodplains> para estudiar las tendencias de las variables hidrometeorológicas para la identificación de eventos extremos.

El procesamiento de la información DFO se realizó a nivel diario para establecer un análisis de inundación e identificar el mes representativo al escenario extremo más seco y el más húmedo, para observar el comportamiento del fenómeno en el transcurso de todo el año. Posteriormente, se unificaron los días correspondientes a cada mes y se realizó una unión de geometrías con el fin de obtener el área de inundación por mes. Una vez definidos, se trabajó con datos en formato vectorial para los años 2011 y 2015, respectivamente. Además, se utilizaron los datos diarios del SMN para establecer la dinámica pluvial particular en ese período, e identificar y corroborar las fluctuaciones atípicas en el caso de presentarse inconsistencias con la información obtenida del DFO. Este proceso definió áreas con cuerpos de agua permanentes y temporales como los presentados en el capítulo 2, realizado con Gómez *et al.* (2017), lo cual permitió comparar espacialmente los dos escenarios extremos y su estado intermedio.

A partir de este análisis se determinó con geoprocesamiento, la frecuencia de días de inundación de los registros o polígonos de inundación mensual para cada año. Este proceso fue realizado mediante la fusión de registros y la unión geoespacial de los datos con respecto a sí mismos, con el fin de obtener, cuántos días al año o al mes, un polígono se encuentra inundado. Es importante mencionar que la información del DFO diaria para la zona de estudio está incompleta (no hay disponibles registros en la web). De igual forma se planteó el procedimiento por mes individual para observar la dinámica particular, y de esta manera identificar las fluctuaciones atípicas en el caso de presentarse inconsistencias con la información obtenida del Servicio Meteorológico Nacional.

Este procedimiento maneja un gran volumen de información geoespacial, por lo tanto, se diseñó un Modelo de Procesos (*Model Builder*, MB) con herramientas SIG, mediante el software geográfico ArcGIS 10®, el cual compiló la información, a partir de la base de datos geográfica (GDB por sus siglas en inglés) construida, y luego la organizó en formato tabular, expresando resultados a nivel mensual y anual, generando áreas y reportes de los días y áreas de inundación (Figura 5.1).

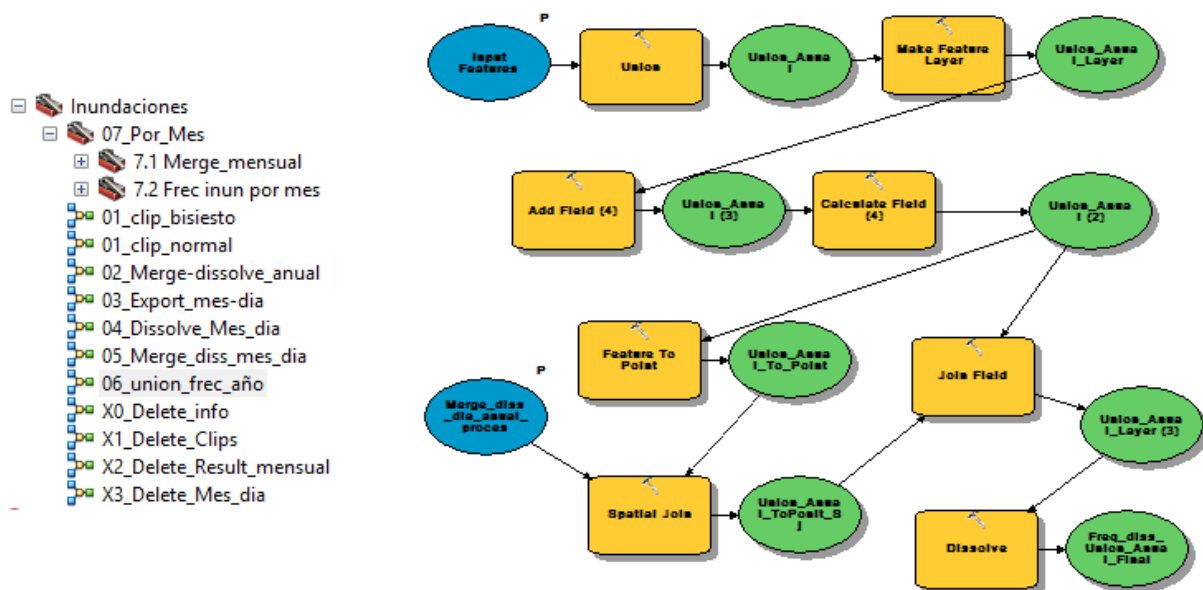


Figura 5.1 Modelización de procesos (MB) en ArcGIS 10®.

De manera complementaria, para observar la dinámica obtenida, se utilizaron imágenes satelitales disponibles en Google Earth®¹³ (GE) como apoyo comparativo de ocupación de agua en superficie, y archivos vectoriales de cartografía oficial de la distribución de los cuerpos de agua (lagunas y bañados) del Instituto Geográfico Nacional (IGN, s.f.), que permitieron corroborar la extensión de zonas inundadas.

Para cada año analizado (2012 y 2015), se realizó un proceso de contabilización sistemática donde cada píxel de la cuenca fue evaluado diariamente respecto a la presencia o ausencia de agua superficial. El algoritmo asigna un valor de 1 cuando se detecta agua en un píxel determinado en un día específico, y 0 cuando no se detecta. La sumatoria acumulada de estas detecciones a lo largo de los 365 días del año genera el valor final de frecuencia diaria para cada píxel, expresado en la Ecuación 5.1.

$$\text{Frecuencia_diaria_pixel} = \Sigma (\text{detecciones_agua_día}_1 + \dots + \text{detecciones_agua_día}_{365}) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

El resultado de la modelización se categoriza según el valor acumulado por píxel que puede oscilar teóricamente entre 0 (ausencia total de agua durante todo el año) y 365 (presencia permanente de agua durante todos los días del año). El valor máximo observable está limitado por la disponibilidad de imágenes satelitales libres de cobertura nubosa y por la frecuencia de revisita del sensor, que resulta en valores máximos típicamente inferiores a 365 días, en el área en estudio.

Los mapas resultantes del geoprocesamiento muestran una clasificación categórica de la frecuencia de presencia de agua en cinco rangos discretos:

1. 1-50 días/año (rojo): Áreas con presencia de agua muy ocasional o episódica,
2. 51-110 días/año (naranja): Zonas con anegamiento temporal bajo,
3. 111-170 días/año (amarillo-verde): Sectores con presencia de agua estacional moderada,

¹³ <https://earth.google.com/web/>

4. 171-230 días/año (verde-celeste): Áreas con alta persistencia de agua estacional,
5. 231-300 días/año (azul): Cuerpos de agua con características de permanencia o semi-permanencia.

5.3 Resultados y discusión

Considerando que la disponibilidad de datos de la DFO se restringe al período 2012–2015, se elaboró un análisis pluvial mensual utilizando registros del SMN para ese período, con el objetivo de captar de manera más representativa la variabilidad climática y reducir la influencia de fluctuaciones puntuales en la interpretación de la tendencia.

Para el período analizado, se identificó con condiciones más secas que el promedio, con un registro de 1,1 mm en diciembre de 2011, frente a una media mensual de 157,6 mm para enero, del período considerado. Asimismo, agosto de 2015 evidenció un exceso pluvial anómalo, con una precipitación mensual de 357,1 mm, muy superior a la media mensual de 126,5 mm. Estos contrastes pluviométricos entre 2012 y 2015 resultan consistentes con los patrones de variabilidad documentados por Scarpati *et al.* (2011), quienes analizaron el excedente hídrico en el suelo de la cuenca del río Salado durante un período de cuarenta años, identificando un incremento en la frecuencia de eventos extremos coherente con el aumento de las precipitaciones registrado en la región durante las últimas décadas del siglo XX.

Como ejemplo representativo, se presenta la precipitación mensual de la localidad de Junín, correspondiente a dicho período, junto con el promedio mensual. En particular al período DFO se corrobora que los extremos mínimo y máximo son en diciembre 2011/enero 2012 y 2015 respectivamente, como se identificaron (Figura 5.2).

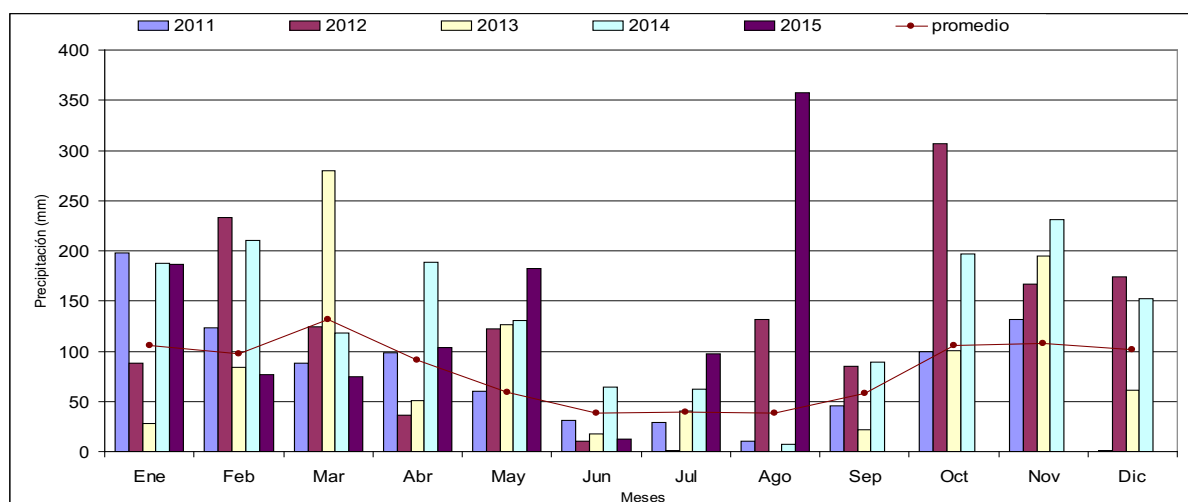


Figura 5.2 Precipitación mensual del período 2011-2015.

El análisis comparativo de la precipitación mensual registrada en Junín para los años 2011/2012 y 2015, permite identificar situaciones contrastantes de déficit y exceso pluvial. En el caso de 2011/2012, se observa que, durante gran parte del año, y particularmente en los meses invernales, las precipitaciones se ubicaron sistemáticamente por debajo del promedio, con valores muy reducidos entre junio y

agosto, donde incluso se registran meses con precipitaciones prácticamente nulas. Esta persistencia de déficits respecto de la media mensual evidencia una condición de sequía, caracterizada por una insuficiente recarga hídrica y una marcada restricción del aporte pluvial anual.

Por el contrario, 2015 presenta un comportamiento opuesto, con precipitaciones mensuales que superan ampliamente el promedio histórico en varios meses clave. Se destacan excesos significativos en agosto y octubre, con valores notablemente superiores a la media mensual, que incrementa sustancialmente el total anual. Esta recurrencia de eventos por encima del promedio indica la ocurrencia de excesos hídricos, con alta probabilidad de generar anegamientos y un aumento en los excedentes de escurrimiento superficial. Esta dinámica de alternancia entre condiciones extremas opuestas ha sido caracterizada por Scarpati y Capriolo (2018) como una constante en la región pampeana, donde casi todos los años se registra algún evento hidrológico extremo, evidenciando la necesidad de contar con sistemas de monitoreo que permitan cuantificar espacialmente estas fluctuaciones.

El análisis a nivel de píxel de los datos aportados por DFO a nivel diario permitió identificar los cuerpos de agua con mayor frecuencia de días con presencia de agua (*join count*) al interior de la cuenca A1, considerando la resolución espacial propia de la información vectorial del DFO, como se muestra en la Figura 5.3. Esta resolución espacial, aunque relativamente gruesa comparada con sensores de mayor resolución como Landsat, resulta apropiada para el mapeo de inundaciones a escala regional, particularmente en ambientes de llanura donde los eventos de anegamiento cubren extensiones considerables (Brakenridge & Anderson, 2006). La metodología basada en MODIS implementada por el DFO ha demostrado ser efectiva para el monitoreo operacional de inundaciones a nivel global, constituyendo una de las fuentes de datos más consolidadas para este tipo de análisis (Tellman *et al.*, 2021).

En la Figura 5.3 se presenta a la izquierda una tabla con el detalle de ocupación en superficie por categoría de recuento de días de píxeles con agua; al centro un ejemplo de la representación con un límite de laguna del IGN; y a la derecha un detalle ilustrativo de la agrupación de los rangos de píxeles con agua, según la misma leyenda.

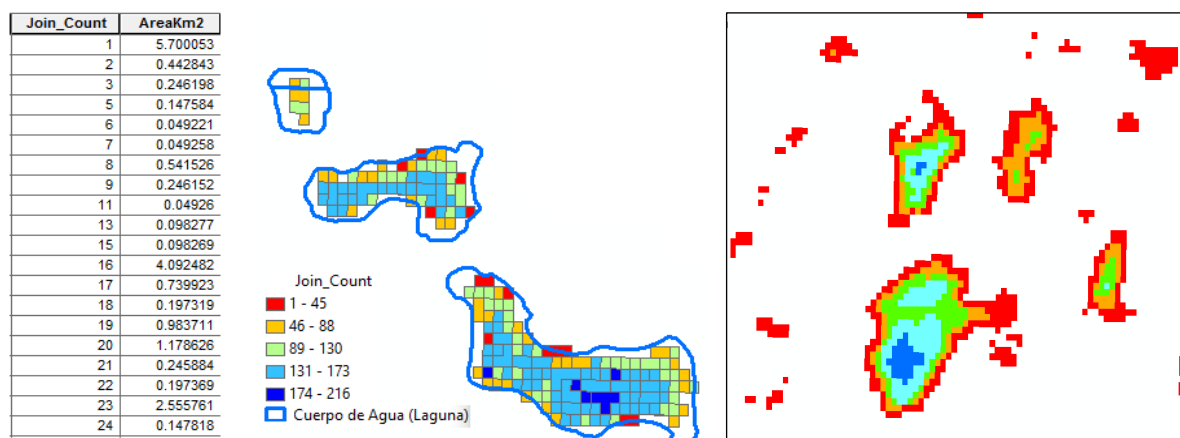


Figura 5.3 Ejemplificación de las frecuencias de presencia diaria de agua, según el análisis con datos de DFO.

El análisis comparativo de los mapas de frecuencia diaria entre los años 2012 y 2015 revela patrones distintivos de la dinámica hídrica superficial en la cuenca A1:

- Año 2012 (Figura 5.4): El mapa evidencia una distribución heterogénea del agua superficial, con predominancia de áreas en los rangos de menor frecuencia (tonalidades rojizas a naranjas) que ocupan amplias extensiones de la cuenca. Los núcleos azules intensos, que representan cuerpos de agua con presencia durante 231-300 días del año, se concentran principalmente en depresiones topográficas específicas localizadas en los sectores central y sur de la cuenca, asociadas a lagunas permanentes o semi-permanentes. El patrón espacial muestra una distribución dispersa de estos núcleos permanentes, rodeados por aureolas de tonalidades intermedias (amarillo-verde) que indican zonas de transición con comportamiento estacional.

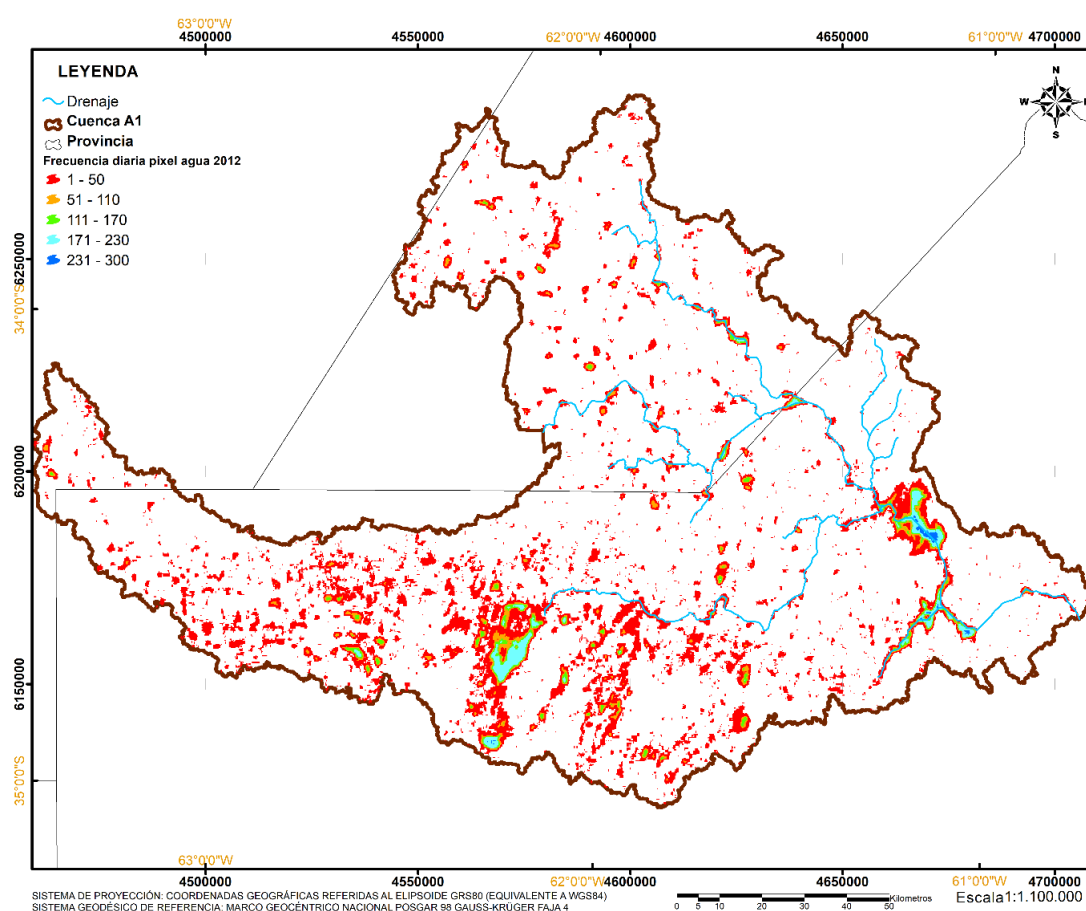


Figura 5.4 Frecuencias de presencia diaria de agua para 2012, según el análisis con datos de DFO en la cuenca A1.

- Año 2015 (Figura 5.5): El mapa de 2015 exhibe una expansión significativa de las áreas con mayor frecuencia de agua. Los núcleos azules presentan mayor extensión espacial y se observa un incremento notable en las categorías intermedias (111-230 días/año), particularmente evidentes en el sector noreste y en las zonas periféricas a los cuerpos de agua permanentes. Esta expansión sugiere condiciones hidrometeorológicas más húmedas durante 2015 respecto a 2012, coherente con los registros de precipitación anual analizados, donde 2015 registró precipitaciones superiores en las tres estaciones meteorológicas evaluadas.

La transformación del paisaje hidrológico entre estos dos años extremos ilustra la elevada sensibilidad de los ambientes de llanura pampeana a las fluctuaciones pluviométricas, donde incrementos moderados en la precipitación pueden traducirse en expansiones sustanciales del área anegada debido a las pendientes extremadamente bajas que caracterizan la cuenca A1 (Scarpati *et al.*, 2002). Además, es importante resaltar lo que mencionan Kruse y Ainchil (2017), que expresan que esta configuración espacial es característica de los sistemas de drenaje deficiente propios de la pampa deprimida, donde la ausencia de una red hidrográfica integrada determina que el agua superficial se acumule en depresiones locales sin conexión evidente entre sí.

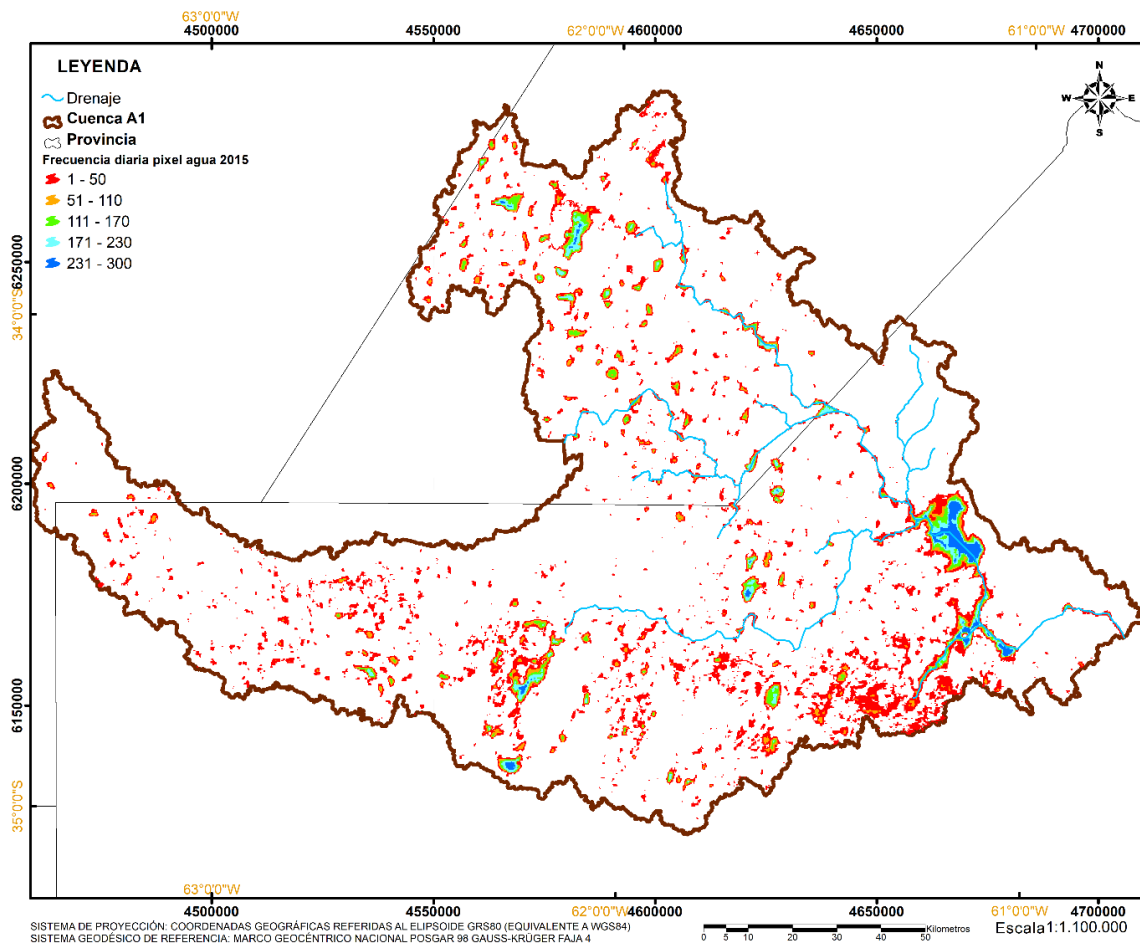


Figura 5.5 Frecuencias de presencia diaria de agua para 2015, según el análisis con datos de DFO en la cuenca A1.

Los núcleos azules identificados en ambos mapas representan sectores donde la presencia de agua se mantuvo durante la mayor parte del año (231-300 días), aunque no necesariamente de forma absolutamente continua. Esta categoría incluye:

- Lagunas permanentes de gran tamaño: Cuerpos de agua que mantienen su espejo líquido durante todo el año o la mayor parte del mismo, correspondientes a las depresiones topográficas más profundas de la cuenca.
- Sectores de cauces principales: Tramos del río Salado y sus tributarios principales donde existe circulación hídrica persistente.

- Áreas de anegamiento semi-permanente: Depresiones que, si bien pueden experimentar retracción durante períodos secos breves, mantienen agua superficial durante la mayor parte del año debido a su posición topográfica baja y/o a aportes subsuperficiales del acuífero freático.

La persistencia de estos cuerpos de agua, incluso durante años caracterizados como secos, evidencia la estrecha relación entre el agua superficial y el nivel freático en este tipo de ambientes, donde los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) predominan sobre el escurrimiento superficial concentrado (Kruse & Ainchil, 2017).

En conjunto, la Figura 5.4 evidencia que 2012 puede caracterizarse como un año seco, dominado por déficits pluviométricos persistentes, mientras la Figura 5.5 del 2015 responde a un año húmedo, condicionado por precipitaciones excepcionales y concentradas que generan excesos hídricos.

A nivel mensual, en la Tabla 5.1 se presentan los resultados de los procesos con SIG, identificando las diferentes áreas inundadas para en los dos años analizado, en los cuales se observa el mes de enero de 2012 como el dato con menor área de inundación y el mes de agosto de 2015 como el mayor.

Tabla 5.1. Área inundada por mes de los años 2012 y 2015.

Mes	Ocupación en superficie (km ²)	
	2012	2015
1	127,58	346,04
2	333,19	341,64
3	868,81	472,68
4	637,45	522,54
5	529,18	765,14
6	631,14	1.053,89
7	532,4	1.124,89
8	539,7	1.306,27
9	589,9	957,02
10	1.150,69	721,45
11	1.277,95	772,27
12	1.188,39	665,82

La comparación espacio-temporal los escenarios extremos pluviales identificados se presentan en la Figura 5.6. que indica la diferencia de ocupación de agua en superficie, donde al comparar con la cartografía de los cuerpos de agua del IGN, se encontró para 2015, gran similitud en ocupación en superficie de los bañados, los cuales poseen un régimen no permanente, y las lagunas que poseen regímenes mixtos, permanentes y transitorias.

Esta concordancia entre los datos satelitales DFO y la cartografía oficial del IGN constituye una validación empírica de la metodología aplicada, demostrando que los productos derivados de sensores MODIS capturan adecuadamente la extensión de los cuerpos de agua en este tipo de ambientes. Tellman *et al.* (2021), en su análisis global de 913 eventos de inundación, destacaron la capacidad de los datos DFO-MODIS para proporcionar información consistente sobre la extensión de inundaciones, particularmente valiosa en regiones donde la información de campo resulta limitada o inexistente.

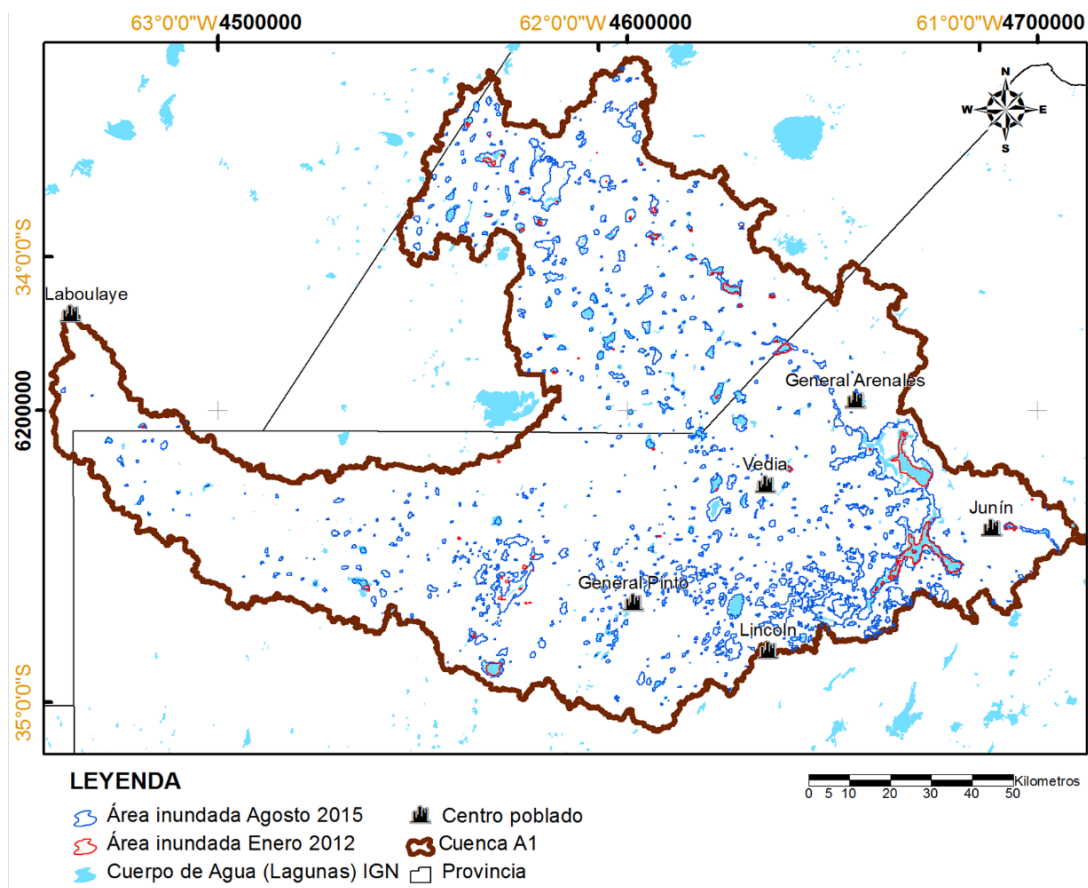


Figura 5.6 Comparación espacio-temporal de escenarios hidrológicos extremos.

Los resultados encontrados a partir de la Figura 5.6 expresan que:

- ✓ En el caso del escenario extremo de sequía que se presentó en diciembre 2011 a enero 2012, representa la menor existencia de zonas inundables, ocupando 127,58 km² (0,72%).
- ✓ El escenario de inundación extremo, en agosto de 2015, contiene la mayor ocupación con agua superficial debido al exceso de precipitación mensual (1.306,27 km² = 7,36%).

La magnitud de esta diferencia (factor de aproximadamente 10 veces entre el mínimo y máximo histórico del período) refleja la amplitud de la variabilidad hidrológica característica de la cuenca A1. Estos valores resultan coherentes con los documentados por Scarpati *et al.* (2011), quienes identificaron para la cuenca del río Salado incrementos significativos en la frecuencia de eventos con exceso de agua en el suelo durante las últimas décadas.

5.4 Conclusiones

Los datos brindados por el DFO se aplicaron para observar y analizar la inundabilidad espacio temporal del noroeste bonaerense, que, debido a su topografía plana y características edáficas, es propenso a sufrir de inundaciones significativas en periodos de lluvias intensas. La información proveniente de estas imágenes de satélite permite cuantificar áreas inundables.

La información espacial analizada, en formato vectorial, al encontrarse a nivel diario contribuyó a realizar mapas de frecuencias de inundación en la zona de estudio, los cuales permitieron un mayor detalle al momento de detectar áreas propensas a inundación repentina en el caso de precipitación extrema en la región. Apoyándose en información meteorológica existente en la zona fue posible identificar escenarios extremos de déficit y exceso hídrico en el período, los cuales constataron la información proveniente del DFO.

La comparación entre varias fuentes de información espacial, como la cartografía oficial del IGN respecto a cuerpos de agua, permitió validar los límites identificando variantes en la extensión del área de ocupación.

La metodología de frecuencia diaria resultó particularmente apropiada para ambientes de llanura como la cuenca A1, donde la distinción entre agua permanente y estacional no es dicotómica sino gradual, existiendo una amplia gama de situaciones intermedias. La clasificación en cinco categorías permitió capturar esta gradualidad y proporciona información cuantitativa sobre la persistencia temporal del agua en cada localización. Este enfoque categórico facilita la interpretación de los patrones espaciales de anegamiento y permite establecer zonificaciones útiles para la planificación territorial, aspecto especialmente relevante considerando que Vázquez *et al.* (2008) determinaron que aproximadamente el 22,8% del área destinada a cultivos en la subcuenca B4 se localiza en sitios donde la recurrencia de anegamiento supera el 40%.

Otro punto para tener en cuenta, como lo evidenciaron Lin *et al.* (2019) al evaluar productos globales de inundación NASA/DFO, es identificar que la similitud espectral entre agua y sombras puede generar clasificaciones erróneas en algunas condiciones. Sin embargo, este problema resulta menos significativo en ambientes de llanura como la pampa deprimida, donde la ausencia de relieve minimiza los efectos de sombra topográfica.

Es importante señalar que esta metodología presenta algunas limitaciones inherentes que deben considerarse en la interpretación de los resultados. La frecuencia observada está condicionada por la disponibilidad de observaciones satelitales válidas, la cual varía espacialmente en función de la cobertura nubosa recurrente, particularmente durante los eventos de precipitación intensa cuando la detección de inundaciones reviste mayor interés. Asimismo, la resolución espacial de los datos DFO (aproximadamente 250 metros) puede no capturar adecuadamente cuerpos de agua de dimensiones reducidas o sectores de anegamiento somero en áreas vegetadas. No obstante, estas limitaciones son comunes a los productos derivados de sensores ópticos de resolución moderada y no invalidan la utilidad de la información para análisis a escala de cuenca.

Asimismo, la resolución espacial de los datos DFO puede no capturar cuerpos de agua de dimensiones reducidas o sectores de anegamiento somero en áreas vegetadas.

La información proporcionada por el DFO resulta complementaria a otros productos satelitales de monitoreo de agua superficial, como el Global Surface Water Explorer (GSWE)¹⁴, que aportan al seguimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.6.1 y serán analizados en el capítulo 7 correspondiente de esta tesis. La validación cruzada entre diferentes fuentes de datos satelitales permitió una caracterización más robusta de la dinámica hídrica superficial de la cuenca A1, contribuyendo a la conformación de una base de datos geoespacial integral para aportar a la toma de decisiones en el manejo y planificación del territorio. En particular, la combinación de datos de

¹⁴ <https://global-surface-water.appspot.com/>

frecuencia diaria del DFO con series temporales de mayor extensión como las del GSWE (1984-presente) ofrece la posibilidad de contextualizar los eventos observados dentro de tendencias de más largo plazo.

En síntesis, el análisis multitemporal pluvial y de zonas inundadas mediante datos del DFO permitió caracterizar cuantitativamente la dinámica hídrica superficial de la cuenca A1, identificando patrones de frecuencia de anegamiento consistentes con los antecedentes documentados para la región pampeana. Los resultados confirman la alta susceptibilidad del noroeste bonaerense a eventos extremos de excesos hídricos, con variaciones interanuales que pueden alcanzar un orden de magnitud entre escenarios de sequía e inundación. La clasificación categórica de frecuencias desarrollada constituye un aporte metodológico aplicable a otras cuencas de llanura con características hidrogeomorfológicas similares, y proporciona información espacialmente explícita de utilidad para la planificación territorial y la gestión del riesgo de inundaciones en la región.

5.5 Bibliografía

Brakenridge, R., & Anderson, E. (2006). MODIS-based flood detection, mapping and measurement: The potential for operational hydrological applications. En J. Marsalek, G. Stancalie, & G. Balint (Eds.), *Transboundary floods: Reducing risks through flood management* (NATO Science Series IV, Vol. 72). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-4902-1_1

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.

Dartmouth Flood Observatory [DFO]. (1993). *Active archive of large floods*. University of Colorado. <https://floodobservatory.colorado.edu>

Forte Lay, J., Scarpato, O. E., & Capriolo, A. D. (2008). Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*, 47(4), 341-354. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692008000400004

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354>

Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: Correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>

Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (s.f.). *Capas SIG: Base de Datos Geoespacial Institucional* [Conjunto de datos geoespaciales] (recuperado el 20 de julio de 2019). <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

Kruse, E., & Ainchil, J. (2017). Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: Caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *AUGM DOMUS*, 9, 1-11. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/2482>

Lin, L., Di, L., Tang, J., Yu, E., Zhang, C., Rahman, M., Shrestha, R., & Kang, L. (2019). Improvement and validation of NASA/MODIS NRT global flood mapping. *Remote Sensing*, 11(2), Artículo 205. <https://doi.org/10.3390/rs11020205>

Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica.

https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1

Scarpati, O. E., Spescha, L., & Capriolo, A. (2002). Occurrence of severe floods in the Salado River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 7(3), 285-301. <https://doi.org/10.1023/A:1024427613595>

Scarpati, O. E., Spescha, L. B., Forte Lay, J. A., & Capriolo, A. D. (2011). Soil water surplus in Salado River basin and its variability during the last forty years (Buenos Aires Province, Argentina). *Water*, 3(1), 132-145. <https://doi.org/10.3390/w3010132>

Scarpati, O. E., & Capriolo, A. D. (2013). Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas*, (82), 38-51. <https://doi.org/10.14350/rig.31903>

Scarpati, O. E., & Capriolo, A. D. (2018). Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 79(285), 375-395. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201814>

Schumann, G. J.-P., Brakenridge, G. R., Kettner, A. J., Kashif, R., & Niebuhr, E. (2018). Assisting flood disaster response with Earth observation data and products: A critical assessment. *Remote Sensing*, 10(8), Artículo 1230. <https://doi.org/10.3390/rs10081230>

Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596(7870), 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>

Vázquez, P., Masuelli, S., Platzek, G., & Boolsen, O. (2008). Recurrencia de anegamiento en la depresión del Río Salado: Subcuenca B4. *Revista de Teledetección*, 30, 47-59. <https://www.researchgate.net/publication/236212128>

6 MONITOREO POR TELEDETECCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA SUPERFICIAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS ¹⁵

6.1 Introducción

Las observaciones espaciales tienen el potencial de mejorar significativamente la comprensión de los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y la variabilidad climática, geodinámica, socio-económica, considerando la posibilidad de generación de balances hidrológicos (Pereira *et al.*, 2018). Además, permiten calcular índices agroclimáticos, que indiquen la disponibilidad regional de agua en el suelo, en forma espacial y temporal, según los valores utilizados en el cómputo.

Fernández Long *et al.* (2012) mencionan que el balance hidrológico es un modelo simplificado de estimación de la reserva de agua, en la zona de exploración radicular, o sea en la zona insaturada del suelo. A partir del mismo, es posible cuantificar la disponibilidad de agua durante el ciclo de un cultivo y el agua consumida por la planta.

Tang *et al.* (2010) estudiaron el almacenamiento de agua terrestre (TWS, *Terrestrial Water Storage*, por su sigla en inglés) y lo definen como el agua almacenada sobre y debajo de la superficie terrestre, que incluye nieve, hielo, humedad del suelo, agua subterránea y agua superficial. Los cambios detectados en las anomalías de TWS, derivados de las teleobservaciones del Sistema Satelital GRACE (disponible en <https://www.jpl.nasa.gov/missions/>), representan una medida integrada verticalmente de las variaciones en la acumulación de agua (expresada en centímetros). Ospina Montes (2016) expresa que TWS es controlado principalmente por la humedad del suelo y el agua subterránea, indicando los cambios totales de la columna integrada de agua terrestre almacenada desde el espacio. Estas en anomalías entre el TWS y cambios en agua almacenada, determinados con modelos terrestres, ayuda a desasociar los componentes e identificar áreas inundadas (Thomas *et al.*, 2014). Una vez definidas estas acumulaciones de agua superficial, a nivel geoespacial, se pueden monitorear con teledetección, y establecer sus cambios a escala espacio-temporal, integrándolo con análisis de eventos pluviales, como así también elaborar balances hídricos.

En particular, Cellone *et al.* (2023) realizaron balances de agua en el suelo diarios en la planicie costera del Río de la Plata, para evaluar los cambios, es decir, excedentes, déficits y reserva de agua en el suelo, para el período 2008 – 2014, por medio de un análisis conjunto de balances hídricos e imágenes satelitales. A su vez, generaron una metodología con teledetección, aplicable a diferentes áreas de llanura de similares características. Los resultados logrados mostraron que la respuesta, en relación con la presencia de anegamientos en áreas de llanura, está condicionada en gran medida, por la previa existencia de excedentes hídricos y por las condiciones de saturación del suelo al momento de producirse la precipitación.

Dillon *et al.* (2017) mencionan que, en los últimos meses del año 2016, en el norte bonaerense, Argentina, un nuevo ciclo climático húmedo, provocó serios anegamientos e inundaciones, que

¹⁵ Publicado en: Montealegre Medina, F.A. y F.J.Gaspari. (2023). Monitoreo por Teledetección de la Variación del Almacenamiento de Agua Superficial en Cuencas Hidrográficas. AUGM DOMUS Revista científica de los comités de Aguas, Energía y Medioambiente. Asociación de Universidades Grupo Montevideo y la Universidad Nacional de La Plata. (2023). (10), 004. <https://doi.org/10.24215/18522181e004>

obligaron a las autoridades provinciales a declarar la emergencia agropecuaria en la región, la cual se extendió hasta los primeros meses de 2017. Se corrobora con un informe de la Comisión de Emergencia de la Confederaciones Rurales Argentina, que menciona que al igual que en el 2016, cuando apenas comenzaba la cosecha gruesa, la naturaleza volvió a hacer estragos (Confederaciones Rurales Argentina, 2017), con tormentas se centraron con mayor intensidad sobre partidos de Junín / General Villegas, en la provincia de Buenos Aires, y este de la provincia de La Pampa, generando un sector de la Argentina que, en forma reiterada, es afectado gravemente por inundaciones. En ese momento, en la provincia de Buenos Aires hubo seis millones de hectáreas afectadas, de las cuales el 25% de dicha superficie, estuvo gravemente impactadas por inundaciones, presentando pérdidas irrecuperables de los cultivos e infraestructura. Además, el nivel de las aguas alcanzó a varios cascos urbanos y áreas semiurbanas.

Considerando estos hechos y lo enunciado sobre las inundaciones de abril del año 2017, por Dillon *et al.* (2017), se ha trabajado en forma objetiva en esta temporada húmeda de la cuenca A1 de la Cuenca del Río Salado en la Provincia de Buenos Aires, que integra a la localidad de Junín, considerando esta zona como área de estudio, para plantear el objetivo del trabajo, que es aplicar técnicas de monitoreo por teledetección, para definir la variación del almacenamiento de agua superficial en cuencas hidrográficas.

6.2 Materiales y métodos

El estudio se desarrolló para la cuenca A1, en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (PMRS) (MOSP, 1999; Gómez *et al.*, 2017).

Para el análisis climático fue consultado al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) sobre datos pluviales mensuales, en las estaciones meteorológicas, a nivel regional, de: General Pico Aero, Junín Aero, Laboulaye Aero, Marcos Juárez Aero, Nueve de Julio, Pehuajó Aero, Río Cuarto Aero, Rosario Aero, Trenque Lauquen y Venado Tuerto Aero (Figura 6.1), para el período entre 1960 hasta 2019.

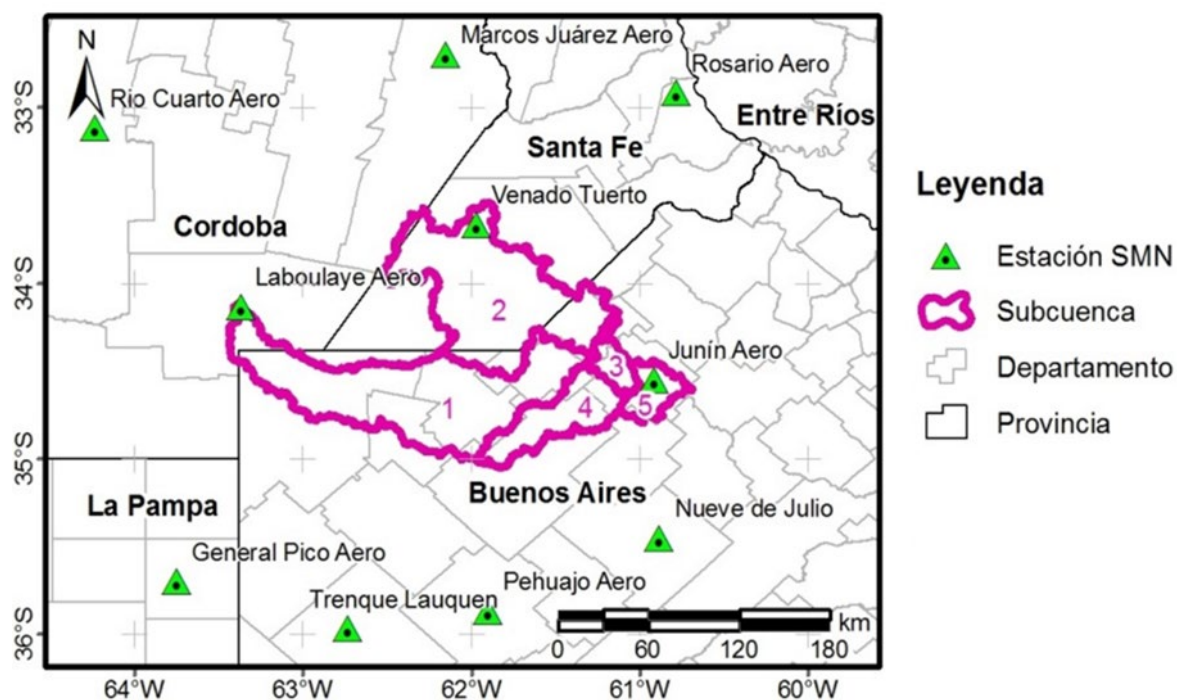


Figura 6.1. Mapa de localización del área de estudio y estaciones meteorológicas del SMN analizadas.

Luego de un procesamiento geoespacial de dichos datos, se identificó que las estaciones de Junín, Laboulaye y Venado Tuerto, dentro de los límites de la cuenca A1 (Figura 6.1), representan en forma coherente, la distribución pluvial del área en estudio. En la Tabla 6.1 se muestra la precipitación mensual para el año 2017, en estas tres estaciones, y se visualiza el gran aumento de lluvias en el periodo entre enero y abril, alcanzando el 55,3% del total anual, que manifiestan al cuatrimestre húmedo y su efecto en las inundaciones mencionadas por Dillon *et al.* (2017).

Tabla 6.1. Datos de precipitación mensual del año 2017. Fuente: SMN

Precipitación mensual por estación meteorológica (mm)				
Mes	Junín	Laboulaye	Venado Tuerto	Promedio mensual para A1 (mm)
Enero	148,9	179,2	158,0	162,0
Febrero	54,0	112,7	100,5	89,1
Marzo	94,9	186,6	145,8	142,4
Abril	359,0	187,0	195,0	247,0
Mayo	98,8	59,8	99,7	86,1
Junio	12,2	23,9	19,1	18,4
Julio	29,5	16,3	19,0	21,6
Agosto	71,0	14,8	38,3	41,4
Septiembre	138,2	89,3	107,0	111,5
Octubre	104,7	41,1	63,0	69,6
Noviembre	29,4	58,0	40,5	42,6
Diciembre	68,0	121,9	190,7	126,9
Total anual (mm)	1.208,6	1.090,6	1.176,6	1.158,6

El balance hídrico en la A1 se determinó con la base de datos del SMN de las 3 estaciones, utilizando el Modelo matemático HidroBio, desarrollado por los Cámara Artigas *et al.* (2012), que aplica el método de Thornthwaite-Matter (Ecuación 6.1) como un complemento autoejecutable del programa Microsoft Excel.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - E - R \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde $\Delta S / \Delta t$ representa el cambio en el almacenamiento de agua terrestre ΔS , durante un período de tiempo determinado Δt ; P es la precipitación mensual (mm / mes); E es la evapotranspiración (mm / mes) y R es el flujo de la corriente o escorrentía (Runoff en inglés).

A nivel geoespacial, utilizando la herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con apoyo en el software libre QGIS®, se implementaron técnicas de teledetección, para el procesamiento cartográfico de las variables de flujo hidrológico P , E y R del método de equilibrio hídrico, con datos provenientes de imágenes satelitales, producto de sensores remotos, de la Plataforma Web Giovanni, que es la interfase web de la NASA (agencia del gobierno estadounidense de Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio), la cual provee información de varios satélites para todas las zonas del mundo. Los datos ya están procesados y pueden ser descargados en una escala requerida (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

Los productos satelitales utilizados (en milímetros mensual) están disponibles en:

- Programa Integrated Multi-satellite Retrievals para GPM (IMERG) versión 6, obtenidos de la plataforma Giovanni de la NASA, que provee información de precipitación acumulada (P) (Huffman *et al.*, 2019).
- Respecto a la evapotranspiración (E), se utilizaron los productos MODIS (MOD16A2) a bordo del satélite EOS-Terra (Earth Observation SystemTerra) (Running *et al.*, 2017).
- La información de escorrentía (R) se obtuvo del Global Land Data Assimilation (GLDAS) versión 2.2 (Li *et al.*, 2020).
- El almacenamiento de agua terrestre (TWS), que expresa el almacenamiento de agua terrestre, se calculó por medio de la diferencia del día final e inicial de cada mes, obteniendo así la ganancia de agua en milímetros en cada periodo.

El intervalo de tiempo considerado en este trabajo fue mensual (Tang *et al.*, 2010), para la temporada húmeda (enero a abril) del año 2017 de la cuenca A1.

6.3 Resultados y discusión

En la Figura 6.2 se presentan los diagramas del balance hídrico del año 2017, como resultado del Modelo HidroBio, corroborando los excesos de agua en toda la región para el periodo húmedo estudiado y presentado en la Tabla 6.2. Se visualizan excesos de agua, comparables en proporción, en los meses de abril y septiembre para las tres localidades, contribuyendo a posibles inundaciones a nivel regional, especialmente en el primer semestre del año, siendo Junín la más afectada puntualmente en el mes de abril. En contraparte, en el segundo semestre se encuentra mayor absorción de agua en el suelo, cercano al mes de noviembre, que, aunado a datos de déficit de agua en este periodo, indicarían una posible escasez hídrica edáfica. Se visualiza, además, que, el momento de recarga es en el mes de enero en Junín y Laboulaye.

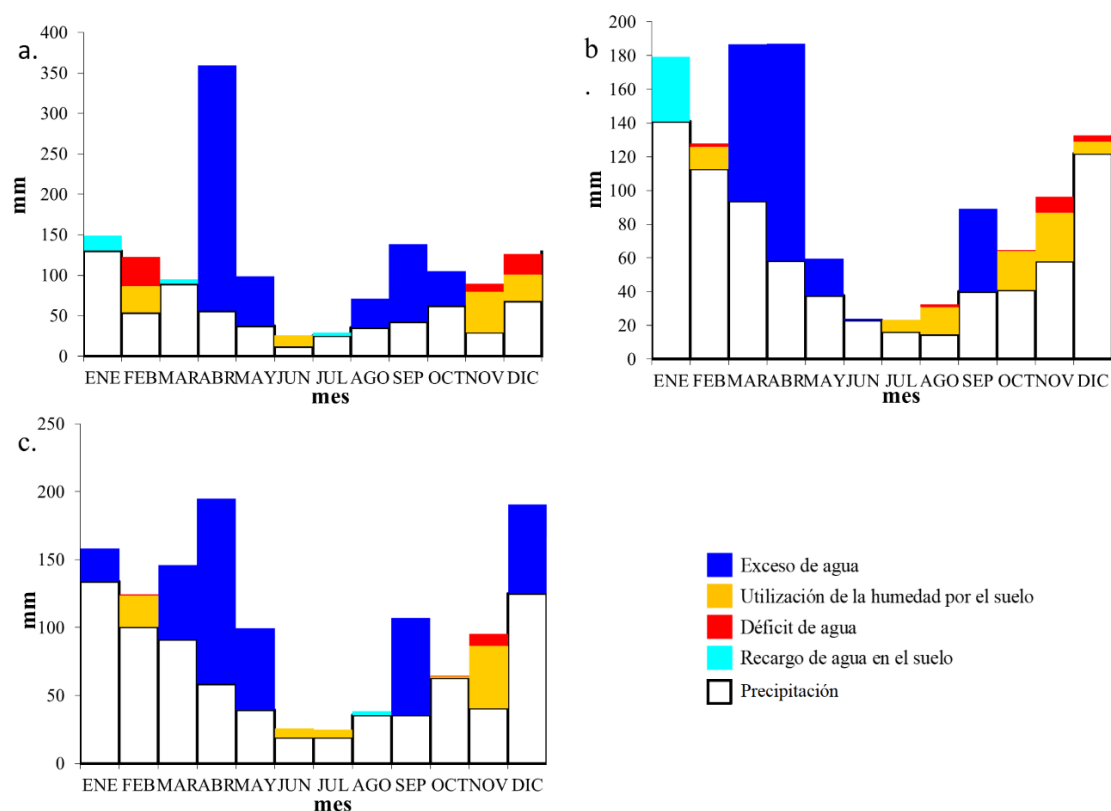


Figura 6.2. Diagrama de balance hídrico de Thornthwaite y Mather (Año 2017). Localidad: a. Junín; b. Laboulaye; c. Venado Tuerto. Fuente: HidroBio (Cámara Artigas *et al.*, 2012).

En la Tabla 6.2 se expone el balance hídrico del año 2017, en las tres localidades en la cuenca A1, como resultado de la aplicación del modelo HidroBio, donde se representa la relación entre los excesos hídricos producidos en el mes de abril y la evapotranspiración, la cual disminuye de forma considerable, sin pérdidas potenciales acumuladas, generando un aumento de agua almacenada en el suelo, mostrando cambios del agua edáfica almacenada, generando excedentes de humedad, y un incremento en la escorrentía superficial en las tres localidades.

Tabla 6.2. Balance hídrico por localidad, en período húmedo, por Modelo HidroBio (Año 2017).

	Mes	T	P	ETP	P - ETP	ppa	ST	ΔST	ETR	Dh	S	R
Junín	Enero	23,5	148,9	130,5	18,4	-83,0	85,4	18,4	130,5	0,0	0,0	6,4
	Febrero	23,5	54,0	122,8	-68,8	-151,8	53,0	-32,4	86,4	-36,4	0,0	3,2
	Marzo	20,6	94,9	89,3	5,6	0,0	58,6	5,6	89,3	0,0	0,0	1,6
	Abril	16,7	359,0	56,1	302,9	0,0	150,0	91,4	56,1	0,0	211,5	106,5
Laboulaye	Enero	24,6	179,2	141,0	38,2	-22,0	129,2	38,2	141,0	0,0	0,0	1,0
	Febrero	24,1	112,7	127,8	-15,1	-37,1	116,0	-13,2	125,9	-1,9	0,0	0,5
	Marzo	21,3	186,6	93,7	92,9	0,0	150,0	34,0	93,7	0,0	58,9	29,7
	Abril	17,3	187,0	58,4	128,6	0,0	150,0	0,0	58,4	0,0	128,6	79,2
Venado Tuerto	Enero	23,9	158,0	134,1	23,9	0,0	150,0	0,0	134,1	0,0	23,9	18,8
	Febrero	23,7	100,5	124,4	-23,9	-23,9	127,0	-23,0	123,5	-0,9	0,0	9,4
	Marzo	20,9	145,8	91,1	54,7	0,0	150,0	23,0	91,1	0,0	31,7	20,5
	Abril	17,2	195,0	58,5	136,5	0,0	150,0	0,0	58,5	0,0	136,5	78,5

Donde *T*: Temperatura media mensual; *P*: Precipitación media mensual (en mm); *ETP*: Evapotranspiración potencial (en mm); *P-ETP*: Pérdidas o adiciones potenciales de humedad en el suelo; *ppa*: Pérdidas potenciales acumuladas; *ST*: Agua almacenada en el suelo; *ETR*: Evapotranspiración real; *Dh*: Déficit de humedad; *S*: Excedente de humedad; *R*: Escorrentía total; ΔST : Cambios del agua almacenada en el suelo.

El resultado del procesamiento geoespacial de cada variable para definir el cambio en el almacenamiento de agua terrestre, para el periodo húmedo del año 2017, se muestra en forma secuencial con información satelital, indicando la distribución de la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, presentado de forma acumulada mensual. En coincidencia, se muestra la distribución de la precipitación acumulada mensual (*P*) (Figura 6.3), donde se perciben los valores más altos en el mes de abril, coincidiendo con los datos del SMN, indicando datos superiores a 300 mm, en especial en la subcuenca 3. Opuestamente, los valores más bajos de precipitación se presentaron en febrero.

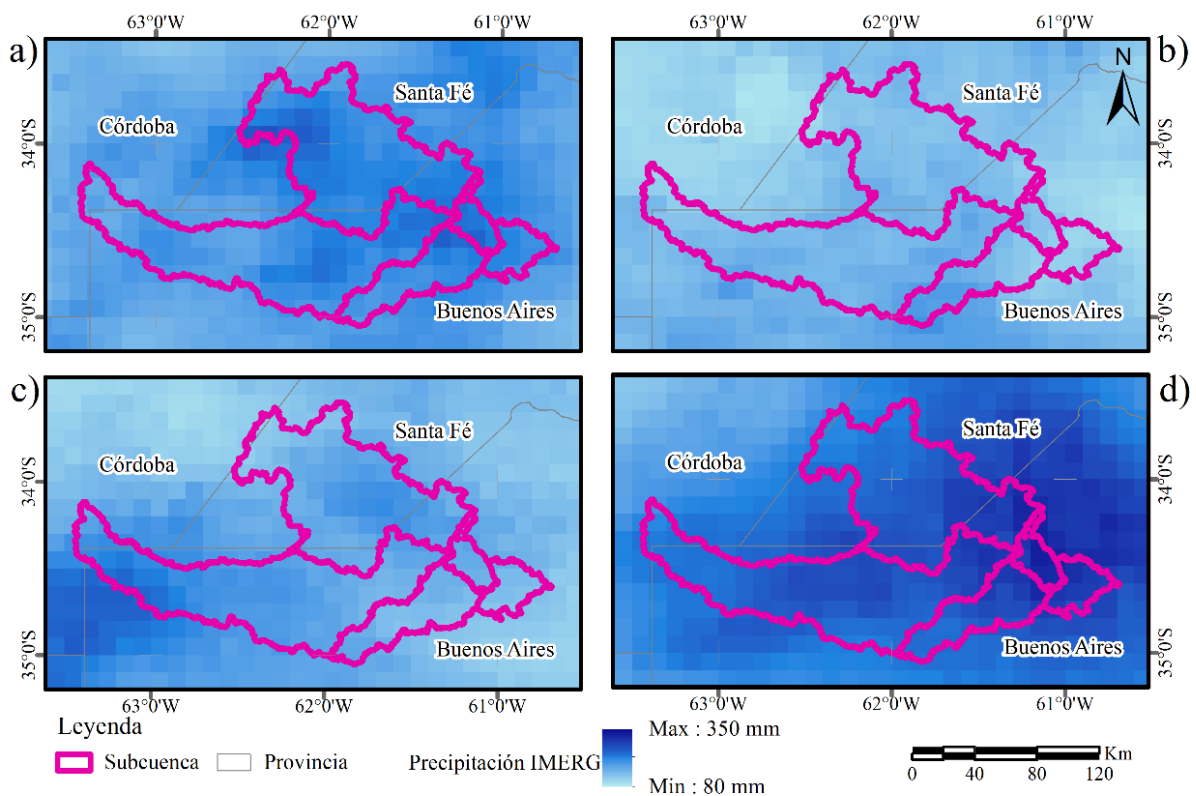


Figura 6.3. Precipitación acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.

La distribución geoespacial de la evapotranspiración acumulada mensual expresó otra respuesta, la cual fue reduciéndose desde enero hacia abril en forma homogénea y constante, debido a la reducción de temperatura en la transición de verano a otoño (Figura 6.4) y cambios fisiológicos de la cobertura vegetal.

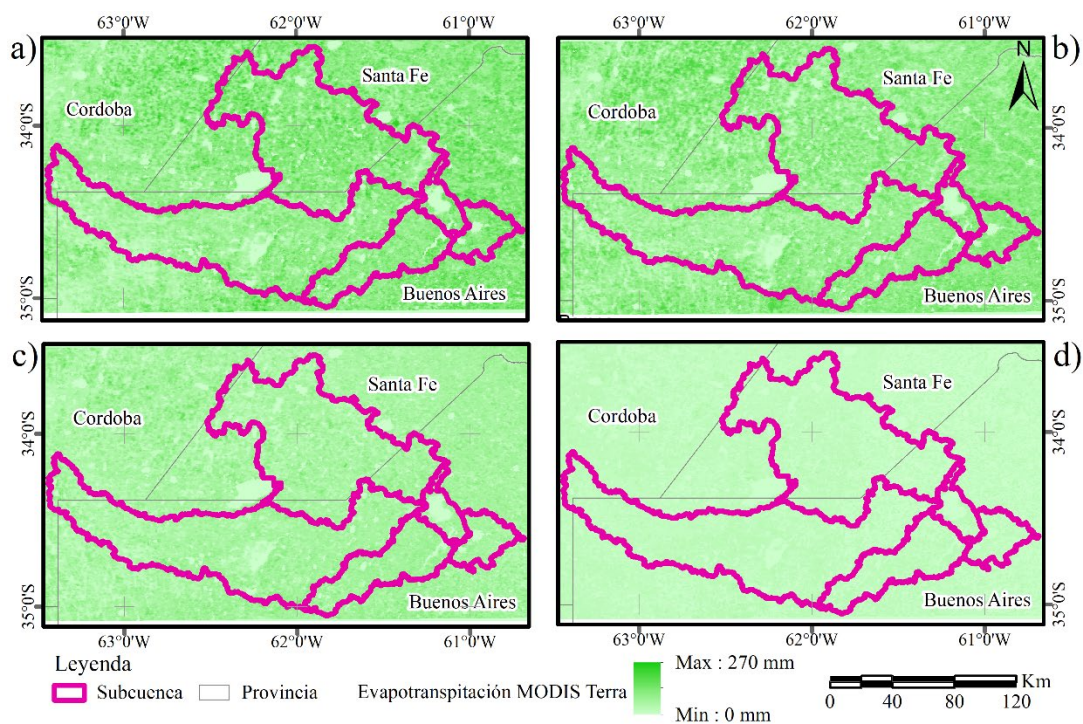


Figura 6.4. Evapotranspiración acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.

En la Figura 6.5 se representa la escorrentía acumulada detectada por el sistema GLDAS, que expresa valores mínimos en los meses de febrero y marzo, hasta el inicio de las lluvias en abril. Es importante mencionar que la subcuenca 1 se muestra como el área donde predomina el escurrimiento superficial, debido a su geomorfología.

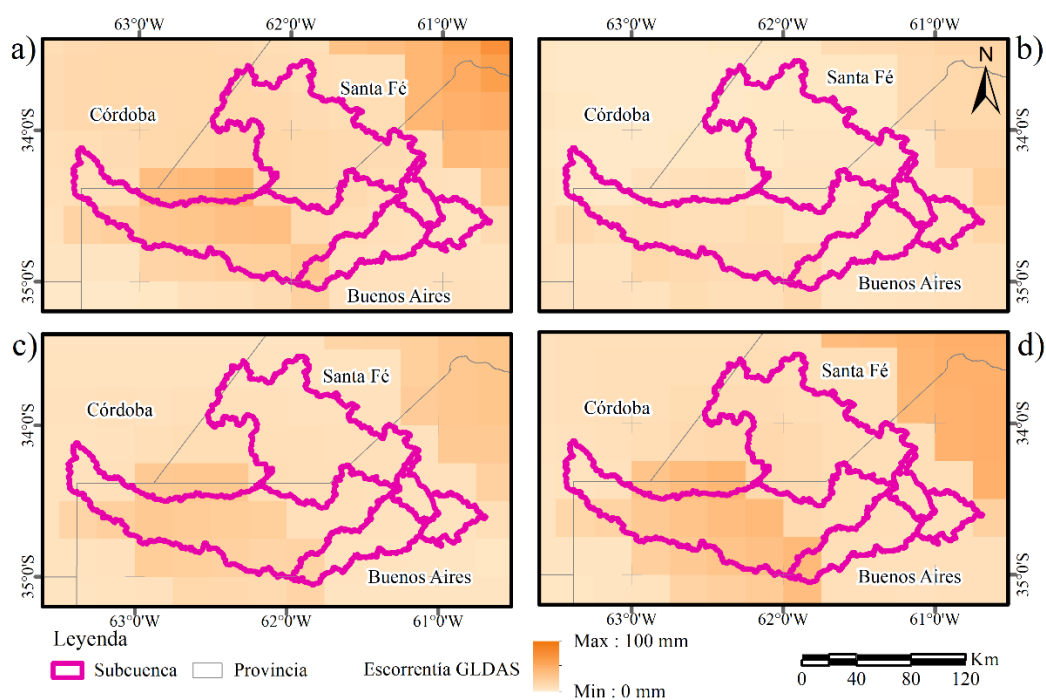


Figura 6.5. Escorrentía acumulada mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.

En la Figura 6.6 se visualiza que la mayor ganancia hídrica (TWS) es en el mes de abril en la zona este de la cuenca A1, representada con colores celeste-azul, mientras que las pérdidas se intensifican en el primer bimestre, indicadas con colores naranja-rojo.

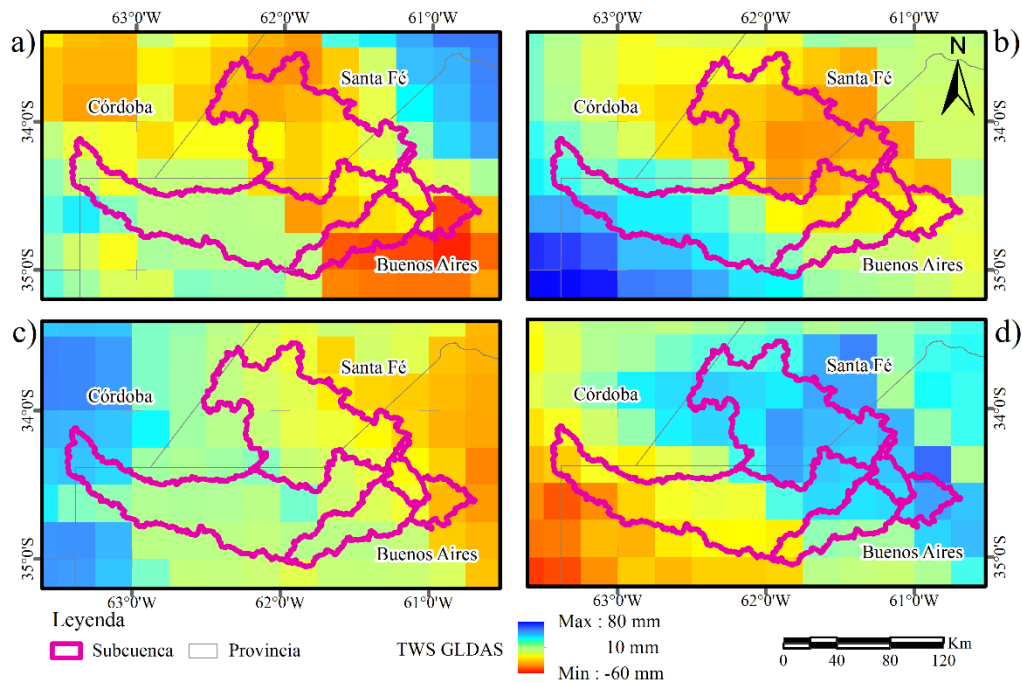


Figura 6.6. TWS mensual (mm) (Año 2017). a) Enero, b) Febrero, c) Marzo, d) Abril.

Los resultados del análisis geoespacial logrados en el periodo húmedo del año 2017 (Figura 6.7), expresan el cambio acumulado en el almacenamiento de agua terrestre (P-E-R), siendo en el noroeste de la cuenca A1 y subcuenca 5, donde se identificó la menor P acumulada, y la máxima se manifestó con 835 mm, en la subcuenca 3.

La E fue máxima en la subcuenca 5 (275 mm), exponiendo los valores más bajos en áreas de lagunas temporales y áreas de bajos o anegamientos, cercanas a planicies de inundación.

El R satelital mostró el máximo en la subcuenca 1 (68 mm), mientras que, en el resto de la cuenca, los valores se mantuvieron uniformes.

En relación con el TWS, se obtuvieron valores negativos, debido a que los tres primeros meses se generaron pérdidas, también representadas en el balance de agua del suelo, y aunque hubo una fuerte precipitación en abril, esta no fue suficiente para cubrir las necesidades hídricas edáficas de todo el periodo considerado.

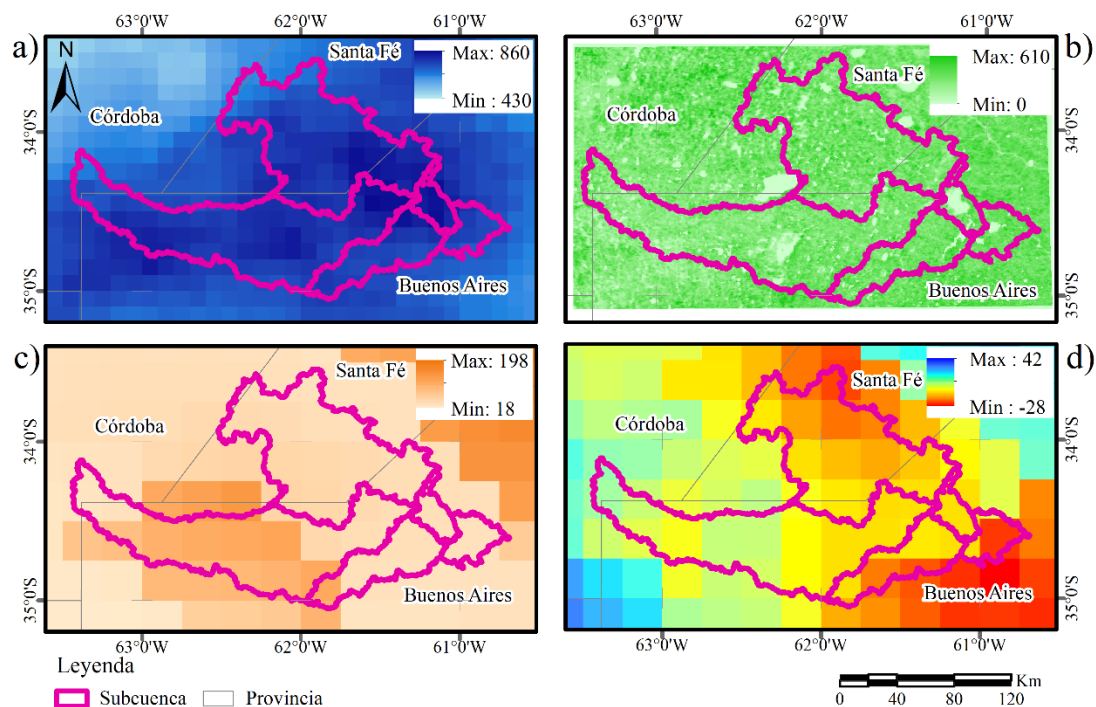


Figura 6.7. Zonificación en valores acumulados (mm) de cada variable del balance hídrico en el periodo húmedo (Enero a Abril) de 2017. a) Precipitación (P), b) Evapotranspiración (E), c) Escorrentía (R), d) Almacenamiento de agua terrestre (TWS).

En la Figura 6.8 se representa el balance hídrico (P-E-R) a nivel geoespacial para el periodo estudiado, identificando la variabilidad de la disponibilidad hídrica representativa de áreas de llanura, obteniendo valores positivos de disponibilidad hídrica entre el 59 y 72%, siendo el máximo en la subcuenca 3 y el mínimo en la 5, coincidiendo los identificados anteriormente.

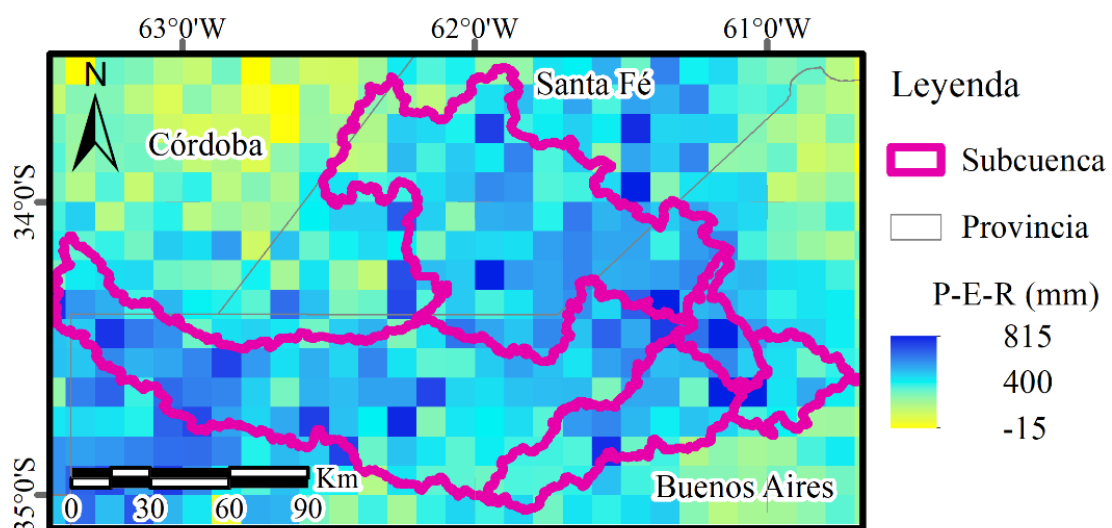


Figura 6.8. Balance hídrico geoespacial para el período enero-abril de 2017 (mm) en la cuenca A1.

El balance hídrico a nivel volumétrico (millones de metros cúbicos = Mm^3) definido por teledetección, reflejó la mayor ganancia en la subcuenca 1 ($37.440,4 \text{ Mm}^3$) debido a su extensa ocupación en la cuenca A1, y en contraparte la subcuenca 3 ($358,2 \text{ Mm}^3$), al ser la más pequeña, generó una menor ganancia hídrica superficial. Las subcuencas 2 y 5 alcanzaron valores semejantes, de $3.204,6$ y $3.551,4 \text{ Mm}^3$, respectivamente; y la 4 obtuvo $904,1 \text{ Mm}^3$.

El procedimiento geoespacial aplicado contribuyó en caracterizar cuantitativamente a cada uno de los componentes hídricos del balance en la cuenca A1, lo cual permitió observar el comportamiento mensual de la acumulación de agua superficial del periodo húmedo del año 2017.

El procesamiento geoespacial del balance hídrico en la cuenca A1 otorgó un lineamiento de la diversidad espacial de las variables hidrológicas intervinientes, utilizando productos satelitales de acceso libre y datos de campo. Por ello, es importante vincular e integrar información meteorológica (precipitación), bases de datos y tecnologías de teledetección espacial, que proporcionan imágenes satelitales, a intervalos regulares, combinadas con parcelas de control, mediante un proceso de validación y ajuste, posibilita hacer efectivo el seguimiento del balance hídrico en extensas áreas agrícolas, como menciona Méndez-Jocik *et al.* (2021) y/o en cuencas hidrográficas.

Asimismo, el presente trabajo demostró que, a través de la combinación de datos superficiales con observaciones desde el espacio, se puede obtener información sin precedentes, la cual ofrece una cobertura geográfica global, un buen muestreo espacio-temporal y un monitoreo continuo en el tiempo, como lo expresa Pereira *et al.* (2018), incluidos cambios del uso del suelo y dinámica de distribución del agua superficial.

Se coincide también, con Dillon *et al.* (2017), en que la generación de cartografía, generada a partir del uso de los geotecnologías, permite construir escenarios, a efectos de que puedan confrontarse con los generados en periodos previos y así, generar, de manera prospectiva, alternativas que permitan adelantar la ocurrencia de los eventos y diseñar planes de mitigación y acción ante la emergencia. Además, como expresa Méndez Jocik *et al.* (2021), la integración de información meteorológica, bases de datos en línea y secuencias temporales de imágenes multiespectrales de los sensores espaciales Sentinel 2A y Landsat 8, y otras bases de datos en línea, permite la estimación y la realización del balance hídrico combinado.

Como menciona Rivas (2014), la teledetección es una herramienta útil en estudios hidrológicos y ambientales, debido a que de la combinación de la información espectral se pueden extraer datos de la superficie a muy bajo costo de alta fiabilidad.

6.4 Conclusiones

La utilización de productos de sensores remotos, en zonas de gran extensión, como es el caso de la cuenca A1, proporciona una mejora en la identificación espacial de las variaciones temporales y anomalías en parámetros hídricos que intervienen en el balance hídrico y en la descripción de la acumulación de agua superficial terrestre.

La zonificación lograda con teledetección, integrada con los datos capturados en estaciones meteorológicas de la región, en el espacio y en el tiempo, facilitó el entendimiento de la dinámica hídrica, cuyos resultados alcanzados pueden formar parte de un programa de apoyo en emergencias hídricas, por medio de proyectos interinstitucionales. La disponibilidad de imágenes satelitales en

plataformas web de acceso libre, permite el acceso a bases de datos geoespaciales a nivel temporal, en una cuenca hidrográfica, colaborando en la gestión sostenible de los recursos hídricos y el territorio.

Se concluye que la metodología aplicada para la definición espacio temporal del balance hídrico con teledetección, es óptima para la aplicación en cuencas hidrográficas de gran extensión, representando en forma fehaciente el almacenamiento de agua terrestre y la distribución de la evapotranspiración y el escurrimiento superficial.

6.5 Bibliografía

Cámara Artigas, R., Martínez Batlle, J. R., & Díaz del Olmo, F. (2012). *Metodología y aplicaciones de los balances hídrico y bioclimático y su aplicación al estudio ecodinámico de las formaciones vegetales*. Grupo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo, Grupo PAI RNM-273. <https://www.geografiasica.org/2012/09/17/plantilla-para-el-calculo-del-balance-hidrico-y-el-diagrama-bioclimatico/>

Cellone, F. A., Borzi, G. E., & Carol, E. S. (2023). Balances hídricos y teledetección aplicados al estudio de inundaciones en la planicie costera del Río de la Plata, Buenos Aires, Argentina. *Revista de Geografía Norte Grande*, (84), 145-164. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022023000100145>

Confederaciones Rurales Argentina [CRA]. (2017). *Inundaciones: Informe de la Comisión de Emergencia de CRA*. <http://www.cra.org.ar/nota/19758-inundaciones-informe-de-la-comision-de-emergencia-de-cra/>

Dillon, B., Pombo, D., Martínez Uncal, M. C., Leone Escuredo, D., & Bossa, J. P. (2017). *Las áreas inundadas y anegadas en el noreste de la provincia de La Pampa*. Programa Proyectos Orientados de Interés Regional (POIRE), Resolución 231/2017, Universidad Nacional de La Pampa.

Fernández Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., & Murphy, G. M. (2012). Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Agronomía & Ambiente*, 32(1-2), 31-47. <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/4>

Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: Correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>

Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2019). *GPM IMERG final precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06* [Conjunto de datos]. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/06>

Li, B., Beaudoin, H., & Rodell, M. (2020). *GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2* [Conjunto de datos]. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. <https://doi.org/10.5067/TXBMLX370XX8>

Méndez Jock, A., Núñez Pérez, A. D. J., & González Robaina, F. (2021). Remote sensing application to water resources management. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(1), Artículo e02. <https://www.redalyc.org/journal/932/93266354002/html/>

Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica.

https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1

Ospina Montes, D. L. (2016). *Análisis de la información proveniente del satélite GRACE para el monitoreo de la acumulación de agua subterránea: Caso ejemplo provincia hidrogeológica de los Llanos Orientales* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58052>

Pereira, A., Cornero, C., Amherdt, S., & Pacino, M. C. (2018). Análisis multitemporal del almacenamiento de agua continental en la Cuenca del Plata mediante gravimetría satelital. En *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (Artículo 434). Instituto Nacional del Agua.

Rivas, R. (2014). *Uso de la teledetección en hidrología* [Material de seminario]. Seminario Aspectos Ambientales de la Hidrología, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. http://cursosihlla.bdh.org.ar/Hidrologia_FCH_UNCPBA_1.pdf

Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2017). *MOD16A2 MODIS/Terra net evapotranspiration 8-day L4 global 500m SIN Grid V006* [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>

Tang, Q., Gao, H., Yeh, P., Oki, T., Su, F., & Lettenmaier, D. P. (2010). Dynamics of terrestrial water storage change from satellite and surface observations and modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 11(1), 156–170. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1152.1>

Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2014). A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(4), 1537–1545.

<https://doi.org/10.1002/2014GL059323>

7 OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE 6.6.1.

7.1 Introducción

La gestión sostenible de los recursos hídricos superficiales constituye uno de los desafíos más relevantes para la planificación territorial en regiones de llanura, particularmente en aquellas caracterizadas por topografías de pendiente extremadamente baja y densidades de drenaje reducidas como la llanura pampeana argentina. En este contexto, la rehabilitación y restauración de llanuras fluviales abarca medidas orientadas a recuperar las funciones naturales de los ríos que pueden haberse perdido o degradado por intervenciones antrópicas y por acción climática, por lo cual el monitoreo sistemático de los cuerpos de agua adquiere particular relevancia para la gestión integral de los recursos hídricos y la planificación territorial (MOSP, 1999; Kruse & Ainchil, 2017). En la última década, la disponibilidad de imágenes satelitales en plataformas web ha permitido el monitoreo e identificar variables espaciotemporales para el apoyo en la gestión sostenible de los recursos hídricos e inundaciones (Pekel *et al.*, 2016; UNEP, 2022).

En la región pampeana argentina, la alternancia de inundaciones y sequías es un fenómeno recurrente que forma parte de un mismo proceso que involucra el clima, la red de drenaje deficiente y las limitantes de los suelos para el almacenamiento de los excedentes (Scarpatti & Capriolo, 2013, 2018).

La condición de llanura predomina en esta región, resultado un escenario de particular fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, tanto de déficit como de exceso hídrico (Forte Lay *et al.*, 2008). En este último caso, la incapacidad del relieve de evacuar volúmenes importantes de agua, junto a otros factores, conduce a la ocurrencia de vastos y persistentes anegamientos que pueden extenderse por meses (Jobbágy *et al.*, 2008). Es importante mencionar, que la presencia de agua superficial resulta fundamental para el desarrollo sostenible desde escala local hasta regional, aunque su persistencia se ve afectada por la variabilidad climática y la actividad antrópica (Bohn *et al.*, 2016; Pekel *et al.*, 2016).

La gestión para la restauración de ríos y llanuras de inundación no solo genera beneficios para el funcionamiento ecológico del sistema fluvial, sino también para la sociedad humana mediante la reducción del riesgo de inundación, la mejora de la calidad del agua, la recarga de agua subterránea y la promoción de la sostenibilidad de los recursos naturales (UNEP, 2022), lo cual aporta a las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los ODS son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia (UNEP, 2021).

En particular, el ODS 6 busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, integrando dimensiones ambientales, sociales y económicas (UNEP, 2021). Dentro de este marco, la meta 6.6 se enfoca en proteger y restaurar ecosistemas relacionados con el agua para 2020, incluyendo montañas, bosques, humedales, ríos, acuíferos y lagos, reconociendo su rol vital en la regulación hídrica y la biodiversidad (UN-Water, 2021).

El indicador 6.6.1, definido como "Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo", constituye una herramienta de medición multifacética que capta datos sobre diferentes tipos de ecosistemas de agua dulce para cuantificar cambios en su extensión espacial. Este indicador facilita el monitoreo de la degradación ambiental, que también sirve como insumo clave para políticas de planificación territorial y adaptación al cambio climático. La plataforma web <https://www.sdg661.app/> proporciona a los países datos precisos, de alta resolución y series temporales sobre agua dulce, fundamentando los procesos de toma de decisiones sectoriales que

pueden afectar la cantidad y calidad del agua presente en los ecosistemas de agua dulce (UNEP, 2022). Estos datos permiten identificar y rastrear las variaciones en la extensión espacial de diversos ecosistemas acuáticos, incluyendo la superficie de lagos y ríos (tanto permanentes como estacionales), la extensión de embalses, y la superficie de humedales vegetados continentales y son procesados utilizando metodologías internacionalmente reconocidas, con resultados evaluados y aprobados por los países, resultando un conjunto de datos globales de alta calidad (UNEP, 2022).

El presente capítulo propone identificar y analizar la extensión de cuerpos de agua superficial en la cuenca A1 del río Salado mediante la aplicación del indicador ODS 6.6.1, utilizando productos satelitales de la plataforma web del Global Surface Water Explorer¹⁶ (GSWE)(Explorador Global de Aguas Superficiales) desarrollado por el Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea y Google en colaboración con el PNUMA (Pekel *et al.*, 2016), integrando datos de precipitación de estaciones meteorológicas a nivel regional.

Pekel *et al.* (2016) expresan que el GSWE permite rastrear los cambios en diferentes tipos de ecosistemas relacionados con el agua. La metodología se basa principalmente en datos de Observación de la Tierra derivados de tecnologías de teledetección, complementados con mediciones *in situ* cuando están disponibles. Esta información contribuyó a la caracterización de la dinámica hídrica superficial de la cuenca y constituyó un insumo fundamental para la posterior evaluación de la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de excesos hídricos, objetivo central de esta tesis doctoral.

7.2 Metodología

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), como agencia custodio del Indicador ODS 6.6.1, ha desarrollado una metodología global coordinada que proporciona un marco de dos niveles combinando el monitoreo global con la posible verificación y uso de datos específicos de cada país (UNEP, 2022).

El objetivo del indicador 6.6.1 es rastrear cambios a lo largo del tiempo en la extensión de ecosistemas relacionados con el agua dulce, así como en la cantidad y calidad del agua dentro de ellos, mediante nueve sub-indicadores organizados en dos niveles (UNEP, 2022):

- Nivel 1 - Sub-indicadores basados en conjuntos de datos disponibles globalmente derivados de Observación de la Tierra: que se refiere a la extensión espacial de aguas superficiales permanentes (lagos, ríos y estuarios) y de aguas superficiales estacionales, a la extensión espacial y calidad del agua de embalses, a la de humedales vegetados continentales y de manglares.
- Nivel 2 - Sub-indicadores basados en datos *in situ* de monitoreo nacional: observa la calidad del agua de lagos grandes (estado trófico y turbidez), cantidad de agua (descarga) en ríos y estuarios, cantidad de agua subterránea dentro de acuíferos (niveles de agua subterránea) y calidad del agua importada del indicador 6.3.2.

Para el presente estudio, el abordaje del análisis de áreas con presencia de agua permanente o estacional se realizó mediante la implementación y procesamiento de la base de datos geoespacial de productos de imágenes satelitales del GSWE, analizando las estadísticas que se producen de acuerdo

¹⁶ <https://global-surface-water.appspot.com>

con la metodología de monitoreo del indicador ODS 6.6.1, Nivel 1, aprobadas por el Grupo de Expertos Interinstitucional. UNEP (2022) establece que la designación de Nivel 1 confirma que el indicador es conceptualmente claro, tiene estándares metodológicos establecidos internacionalmente y los datos se producen regularmente para al menos el 50% de los países y de la población en cada región.

El procesamiento de esta base de datos geoespacial se realizó mediante la aplicación de un algoritmo consistente a 36 años de observaciones de los satélites Landsat 5, 7 y 8, complementadas con Sentinel-2 (1984-2020), de GSWE en el marco del programa Copernicus, el cual se integró para su evaluación con el uso de herramientas geoespaciales en un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el software QGIS.

El GSWE contiene mapas e imágenes elaborados con técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) sobre la distribución espaciotemporal de las superficies de agua que hacen referencia al indicador ODS 6.6.1, mostrando el cambio, ubicación y distribución de las superficies de agua mensual y anual, mediante diversos productos temáticos (Pekel *et al.*, 2016; UNEP, 2022). Los principales productos satelitales utilizados en la presente tesis se describen a continuación:

- Ocurrencia de agua (Water Occurrence): Este producto muestra las zonas donde se localiza el agua superficial y proporciona información sobre la dinámica hídrica del terreno. Representa las variaciones espaciales y temporales (intra e interanuales) de la presencia de agua superficial en el rango temporal de 1984 a 2020, expresado como un porcentaje que indica la frecuencia con la que se detectó agua en cada píxel durante el período completo de observación (Pekel *et al.*, 2016). Este producto captura la variabilidad y los cambios tanto dentro de cada año como entre años, permitiendo identificar áreas con presencia permanente de agua (valores cercanos al 100%) y áreas con presencia ocasional o estacional (valores intermedios). Para la cuenca A1, el procesamiento mensual de este producto permitió identificar la distribución espacial de cuerpos de agua permanentes como lagunas y sectores de cursos fluviales, así como áreas con presencia estacional de agua relacionadas con la dinámica de inundación de la llanura pampeana.
- Intensidad del cambio de ocurrencia (Change Intensity): Este producto proporciona información sobre dónde aumentó, disminuyó o permaneció igual la ocurrencia de agua superficial entre el primer y último año del período analizado, documentando tanto la dirección del cambio como su intensidad (Pekel *et al.*, 2016). Los valores negativos indican disminución en la ocurrencia de agua, mientras que los valores positivos señalan un incremento. Este mapa resulta fundamental para identificar tendencias de largo plazo en la disponibilidad de agua superficial y áreas donde se han producido cambios significativos en la dinámica hídrica. En el contexto de la cuenca A1, este producto facultó el reconocimiento de zonas donde la frecuencia de inundación ha aumentado o disminuido en las últimas cuatro décadas, información relevante para comprender las transformaciones en el paisaje hidrológico y para la evaluación de la vulnerabilidad.
- Estacionalidad (Seasonality): El producto de estacionalidad clasifica la permanencia del agua superficial en cuatro categorías: sin observaciones, sin agua, agua estacional y agua permanente (Pekel *et al.*, 2016). La clasificación se basa en el análisis de la presencia mensual de agua a lo largo del año, considerando el número de meses en que se detectó agua. Las áreas clasificadas como agua permanente corresponden a píxeles donde el agua estuvo presente durante 10 o más meses del año de manera consistente a lo largo del período de estudio. El agua estacional se refiere a píxeles donde el agua estuvo presente entre 1 y 9 meses del año de forma recurrente. Este producto resultó particularmente relevante para caracterizar la dinámica hidrológica de la cuenca A1, donde

predominan cuerpos de agua temporales y áreas de anegamiento estacional asociadas a las características morfométricas de la llanura.

- Recurrencia (Recurrence): La recurrencia mide el grado de variabilidad interanual en la presencia de agua superficial, expresando con qué frecuencia el agua retornó a una ubicación particular de un año a otro, expresado como porcentaje (Pekel *et al.*, 2016). A diferencia de la ocurrencia, que se calcula sobre todo el archivo temporal, la recurrencia se calcula únicamente para el "período de agua" de cada píxel, definido como el lapso entre el primer y último año en que se detectó agua al menos ocasionalmente. Este producto permite distinguir áreas con presencia regular de agua de aquellas con inundación irregular o episódica. En cuencas de llanura como la A1, donde la presencia de agua responde fuertemente a la variabilidad climática, este producto proporcionó la posibilidad de zonificar áreas con comportamiento hidrológico predecible *versus* áreas con mayor incertidumbre en la presencia de agua.
- Transición (Transitions): El producto de transición deriva de una comparación de la estacionalidad entre el primer y último año del período de 36 años, visualizando cambios en las tres clases de agua superficial: sin agua, estacional y permanente (Pekel *et al.*, 2016). Este producto documenta específicamente las siguientes transiciones: pérdida de agua permanente, pérdida de agua estacional, conversión de agua permanente a estacional, conversión de agua estacional a permanente, nueva agua permanente y nueva agua estacional. Para la evaluación de cambios en ecosistemas acuáticos en la cuenca A1, este producto resultó fundamental porque facilitó la visualización geoespacial de las transformaciones en la naturaleza de los cuerpos de agua, generando información relevante para comprender procesos de degradación o recuperación de humedales y para evaluar el impacto de cambios en el uso del suelo y variabilidad climática.
- Extensión máxima de agua (Maximum Water Extent): Este producto combina todos los demás productos al visualizar todas las localizaciones donde se ha detectado presencia de agua al menos una vez durante el período de 36 años (Pekel *et al.*, 2016). Representa la envolvente máxima de la extensión de agua y resulta particularmente útil para delimitar áreas susceptibles a inundación y para la planificación territorial, especialmente en regiones donde la variabilidad hidrológica es alta. En el contexto de esta tesis, la extensión máxima de agua constituyó un insumo fundamental para la delimitación de áreas de vulnerabilidad hidrológica y para la zonificación de riesgo de inundación en la cuenca A1.

Para completar el estudio geoespacial de la información brindada por GSWE, se analizó la información de precipitación provista por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con el objetivo de identificar los años con déficits y excesos pluviales y vincularlos con la dinámica de las áreas inundables durante el período de estudio. Para ello, se procesó información satelital del GSWE, complementada con el análisis de datos de precipitación mensual y anual correspondientes a tres estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca A1: Laboulaye, Venado Tuerto y Junín. La selección de estas estaciones se fundamenta en su adecuada distribución espacial, ya que se localizan en los extremos de la cuenca, que permitió capturar la variabilidad espacial de las precipitaciones en el conjunto del área de estudio y establecer relaciones entre los eventos pluviométricos extremos y las variaciones en la extensión de agua superficial en la cuenca, contribuyendo a la caracterización de la dinámica hidrológica superficial del área de estudio.

7.3 Resultados y discusión

Los productos satelitales del Global Surface Water Explorer aplicados a la cuenca A1 del río Salado permitieron caracterizar de manera comprehensiva la dinámica espaciotemporal del agua superficial durante el período 1984-2020. El análisis reveló una distribución heterogénea de cuerpos de agua en la cuenca, como expresan Bohn *et al.* (2016), representando predominancia de agua estacional sobre agua permanente, característica típica de ambientes de llanura pampeana con pendientes extremadamente bajas y alta dependencia de las precipitaciones.

7.3.1 Ocurrencia de agua

El mapa de ocurrencia de agua (Figura 7.1) muestra la distribución espacial de la frecuencia de presencia de agua superficial en la cuenca A1 durante el período 1984-2020. El gradiente de color desde tonos claros (1%) hasta tonos azul intenso (100%) representa la proporción de tiempo en que cada píxel estuvo cubierto por agua durante el período analizado.

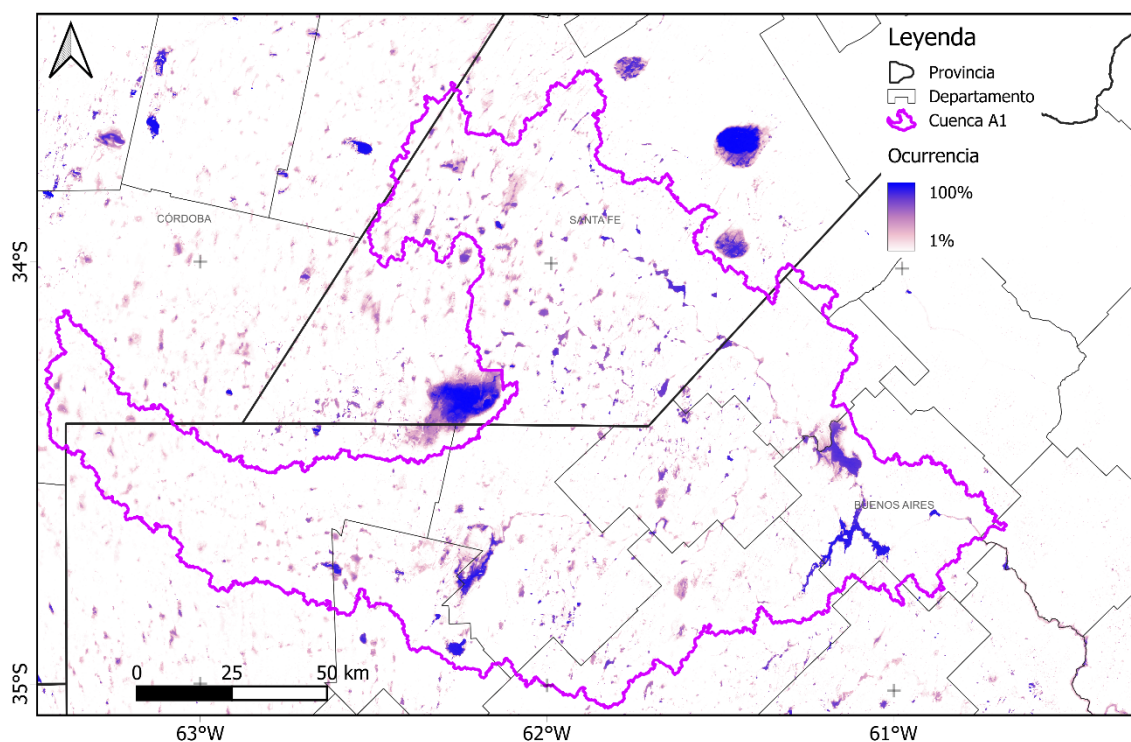


Figura 7.1 Mapa de ocurrencia de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. Los tonos morados y azules representan el porcentaje de tiempo que cada píxel estuvo cubierto por agua, desde 1% (morado claro) hasta 100% (azul intenso).

Los resultados de la Figura 7.1 evidencian que las áreas con mayor frecuencia de presencia de agua (valores superiores al 75%, tonos azul oscuro) se concentran principalmente en lagunas permanentes de gran tamaño localizadas en el sector central de la cuenca, sectores deprimidos del terreno en las zonas de menor cota altimétrica, y algunos tramos de cauces fluviales principales y secundarios. Se

identificaron en particular, cuerpos de agua con ocurrencia superior al 90% (azul muy oscuro), correspondientes a lagunas permanentes que han mantenido agua superficial durante prácticamente todo el período de 36 años. Como mencionan Kruse y Ainchil (2017) estos cuerpos se distribuyen de forma dispersa en la cuenca, reflejando la geomorfología de la pampa deprimida caracterizada por depresiones aisladas

Las áreas con ocurrencia intermedia (30-70%, tonos morados y azul claro) se distribuyen ampliamente en la cuenca, particularmente en las zonas bajas y depresiones menores. Estas áreas representan sectores que han tenido agua superficial de manera recurrente pero no permanente, indicando zonas de anegamiento temporal fuertemente vinculadas a la variabilidad de las precipitaciones, en coincidencia con Scarpati y Capriolo (2018).

La distribución espacial del producto de ocurrencia permitió identificar claramente el patrón de drenaje deficiente característico de la cuenca A1, donde predominan áreas de acumulación de agua sobre canales de escorrentía concentrada, coherente con la densidad de drenaje extremadamente baja reportada en análisis morfométricos del capítulo 3 (0,01-0,06 km/km²).

7.3.2 Cambio en la intensidad de ocurrencia

El producto de cambio en la intensidad de ocurrencia (Figura 7.2) documenta las tendencias de largo plazo en la frecuencia de agua superficial entre el inicio (1984) y el final (2020) del período analizado. La escala bicolor verde (incremento) y rojo (disminución) permite visualizar la dirección e intensidad de los cambios.

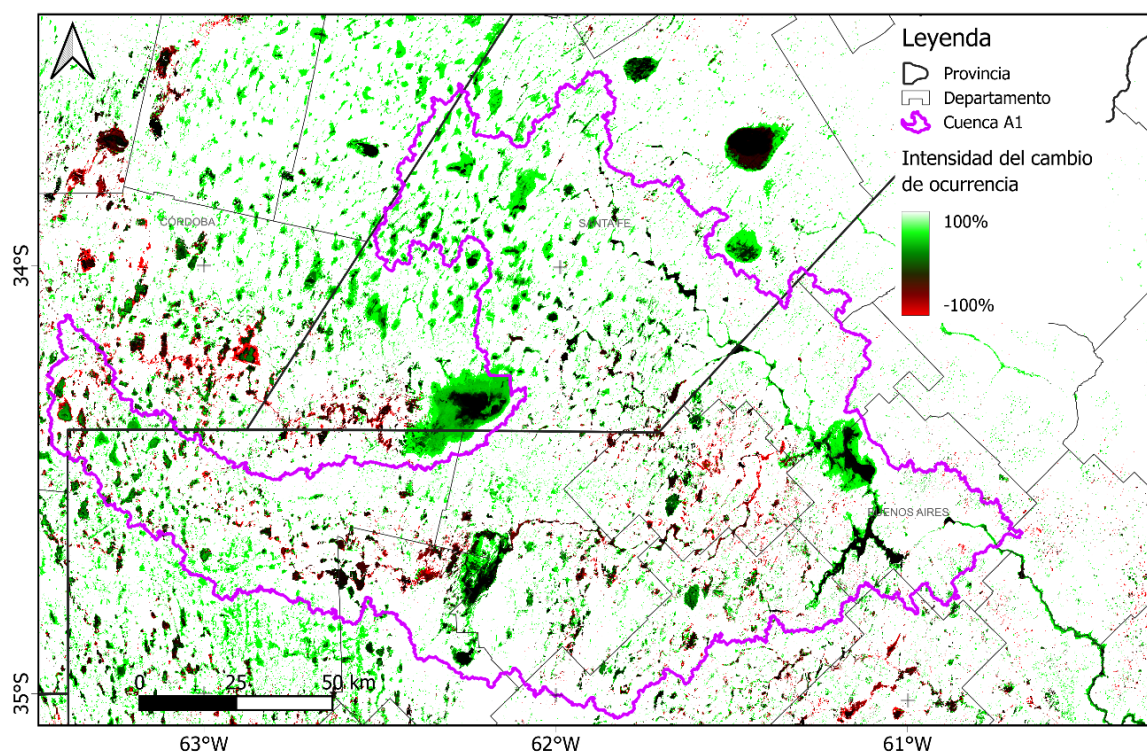


Figura 7.2 Mapa de cambio en la intensidad de ocurrencia de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado de datos GSWE.

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. Los tonos verdes indican incremento en la frecuencia de agua (hasta +100%) mientras que los tonos rojos señalan disminución (hasta -100%).

Los resultados de la Figura 7.2 revelan un predominio marcado de áreas con incremento en la ocurrencia de agua (tonos verdes), particularmente evidentes en amplios sectores de la cuenca que muestran incrementos moderados a altos (verde claro a verde intenso); en zonas periféricas a lagunas existentes donde se ha expandido el área de agua; y en depresiones que han transitado de condiciones secas a anegamiento recurrente.

Los incrementos más significativos (verde oscuro, cercanos al 100%) se concentran en sectores específicos de la cuenca, principalmente en depresiones que durante la primera década del período (1984-1994) estaban mayormente secas pero que en la última década (2010-2020) experimentaron presencia recurrente de agua. Esto resulta coherente con el aumento documentado en las precipitaciones medias anuales en la región pampeana durante las últimas décadas, mencionado por Forte Lay *et al.* (2008) y Scarpati y Capriolo (2018).

Las áreas con disminución en la ocurrencia de agua (tonos rojizos) son significativamente menos extensas y se localizan principalmente en sectores puntuales asociados a grandes lagunas y en algunas áreas donde posiblemente la modificación antrópica (obras de drenaje, terraplenes) haya alterado la dinámica hídrica natural.

Un hallazgo relevante es la presencia de áreas con cambios negativos (rojo) en las inmediaciones de algunas áreas urbanas y zonas con infraestructura vial, sugiriendo que las intervenciones antrópicas pueden haber modificado localmente los patrones de acumulación de agua. Sin embargo, la tendencia dominante a nivel de cuenca es claramente hacia un incremento en la frecuencia de presencia de agua superficial.

Este patrón de incremento generalizado en la ocurrencia de agua durante el período 1984-2020 se relaciona directamente con la tendencia climática documentada para la región, caracterizada por un aumento en las precipitaciones anuales, particularmente notable en la última década del registro, como lo indicaron Aliaga *et al.* (2016) y Brendel *et al.* (2021).

7.3.3 Estacionalidad del agua

El producto de estacionalidad (Figura 7.3) clasifica los cuerpos de agua según el número de meses por año en que presentan agua superficial, utilizando una escala de 0 (sin agua) a 12 meses (agua permanente durante todo el año).

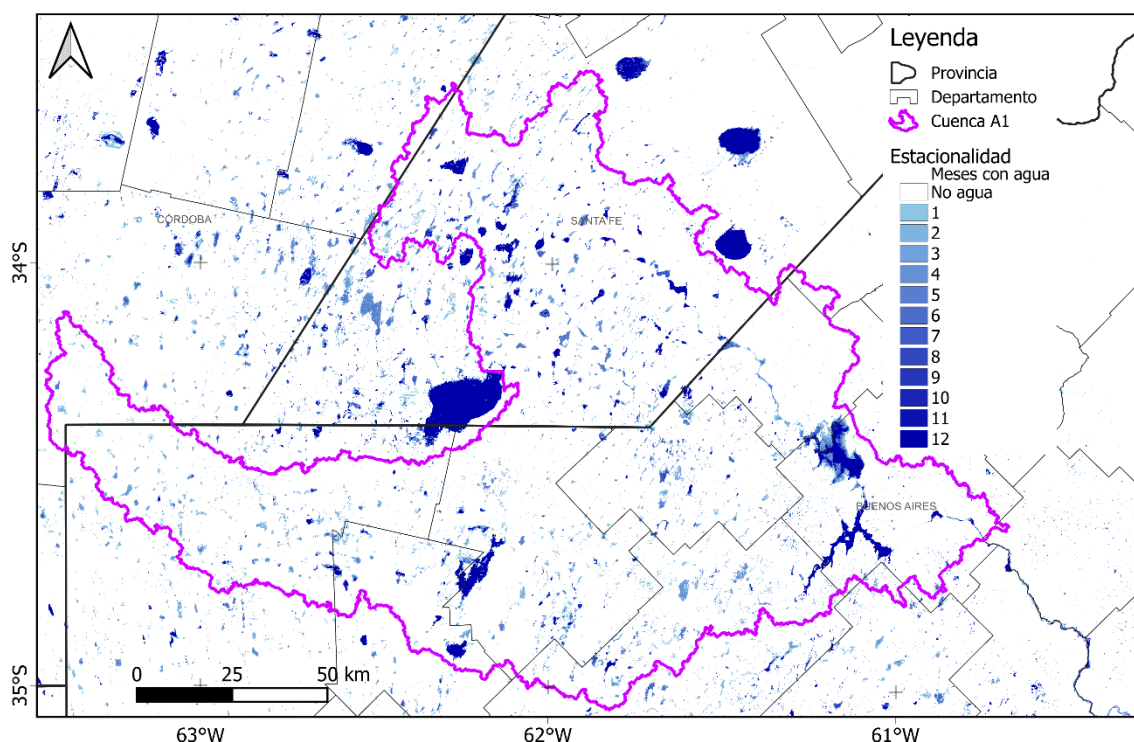


Figura 7.3 Mapa de estacionalidad del agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. La escala de color indica el número de meses por año con presencia de agua superficial, desde áreas sin agua (gris claro) hasta agua permanente durante todo el año (12 meses, azul oscuro).

El mapa evidencia el carácter predominantemente temporal de los cuerpos de agua en la cuenca A1 identificando:

- ✓ Agua permanente (10-12 meses, azul oscuro): Se identifica únicamente en las lagunas de mayor tamaño y algunos sectores de cauces principales. Estas áreas con agua durante 10 o más meses al año representan la menor proporción de la superficie total con presencia de agua en la cuenca, reflejando la escasez de cuerpos de agua verdaderamente permanentes en este ambiente de llanura.
- ✓ Agua estacional moderada a alta (6-9 meses, azul medio): Abarca sectores significativos de la cuenca, principalmente en depresiones de tamaño intermedio y áreas bajas adyacentes a lagunas permanentes. Estas zonas mantienen agua durante gran parte del año, pero experimentan períodos de retracción, típicamente durante los meses de verano cuando la evapotranspiración supera a las precipitaciones (Aliaga *et al.*, 2016).
- ✓ Agua estacional baja (1-5 meses, azul claro): Representa la categoría más extensa en términos de superficie, distribuyéndose ampliamente en toda la cuenca. Estas áreas corresponden a zonas de anegamiento temporal que solo acumulan agua durante períodos específicos del año, típicamente en respuesta a eventos de precipitación intensa o a la acumulación de excedentes durante la estación húmeda (otoño-invierno en la región pampeana).

La distribución espacial del producto de estacionalidad permitió identificar un patrón concéntrico en muchos cuerpos de agua, donde núcleos con mayor permanencia (azul oscuro) están rodeados por

zonas de permanencia decreciente (azul medio y claro), reflejando la dinámica de expansión y retracción estacional característica de las lagunas pampeanas, como lo expresan Quirós *et al.* (2002) y Bohn *et al.* (2016).

Un resultado significativo fue la extensión considerable de áreas con estacionalidad baja (1-3 meses), que indica zonas susceptibles a anegamiento episódico fuertemente controlado por eventos de precipitación extrema. Estas áreas representan sectores de alta variabilidad hidrológica donde la presencia de agua es impredecible y depende de las condiciones climáticas específicas de cada año.

7.3.4 Recurrencia del agua

El producto de recurrencia (Figura 7.4) muestra el grado de variabilidad interanual en la presencia de agua, expresado como el porcentaje de años en que el agua retornó a cada ubicación dentro de su período de agua definido. La escala bicolor celeste-naranja permite distinguir áreas con recurrencia alta (celeste, cercana al 100%) de aquellas con recurrencia baja (naranja, cercana al 1%).

Los resultados en A1 revelan tres patrones claramente diferenciados:

- ✓ Recurrencia muy alta (>80%, celeste intenso): Se concentra en los núcleos de las lagunas permanentes y algunos sectores de cauces principales. Estas áreas representan cuerpos de agua que han mantenido su presencia de manera consistente año tras año durante todo el período analizado, indicando estabilidad hidrológica incluso durante períodos de sequía. Su distribución espacial coincide con las depresiones topográficas más profundas de la cuenca.
- ✓ Recurrencia media (40-70%, tonos intermedios): Abarca extensiones significativas de la cuenca, principalmente en depresiones de tamaño medio y áreas de transición entre zonas de anegamiento permanente y temporal. Estas áreas muestran comportamiento intermitente, con presencia de agua en aproximadamente la mitad de los años del período analizado. Esta recurrencia media indica sensibilidad moderada a la variabilidad climática interanual, con alternancia entre años húmedos (con agua) y secos (sin agua).
- ✓ Recurrencia baja (<40%, naranja): Se distribuye ampliamente en la cuenca, particularmente en las zonas más altas del terreno y en depresiones menores. Estas áreas presentan agua superficial únicamente en los años excepcionalmente húmedos, evidenciando una fuerte dependencia de eventos de precipitación extrema. Según Bohn *et al.* (2016) la presencia de agua en estos sectores es altamente impredecible y está fuertemente modulada por la fase de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

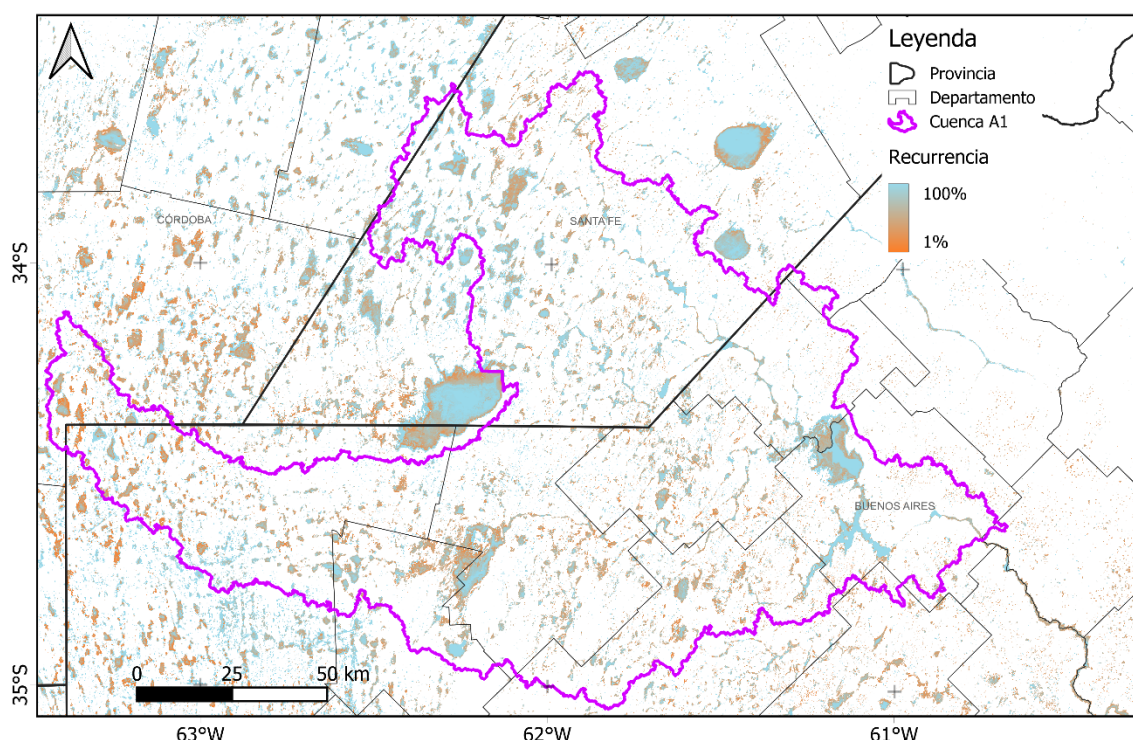


Figura 7.4 Mapa de recurrencia del agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. Los tonos celestes indican alta recurrencia (el agua retorna consistentemente año tras año), mientras que los tonos naranjas señalan baja recurrencia (presencia de agua episódica).

Un patrón notable en la cuenca A1 es la distribución espacial gradual de la recurrencia, formando aureolas concéntricas alrededor de los cuerpos de agua permanentes: núcleos con recurrencia muy alta (celeste) rodeados por zonas de recurrencia decreciente (tonos intermedios y naranja hacia la periferia). Este patrón refleja la dinámica de expansión progresiva de los cuerpos de agua durante años húmedos, comenzando desde los núcleos permanentes.

La información de recurrencia lograda resultó particularmente valiosa para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica, porque permitió diferenciar áreas con riesgo predecible y recurrente de anegamiento (alta recurrencia) de aquellas donde el riesgo es episódico e irregular (baja recurrencia), con implicancias diferentes para la planificación territorial y las actividades productivas.

7.3.5 Transición del agua

El producto de transición (Figura 7.5) documenta los cambios en el tipo de agua superficial entre el primer y último año del período de 36 años, utilizando un código de colores que identifica diez categorías de transición posibles.

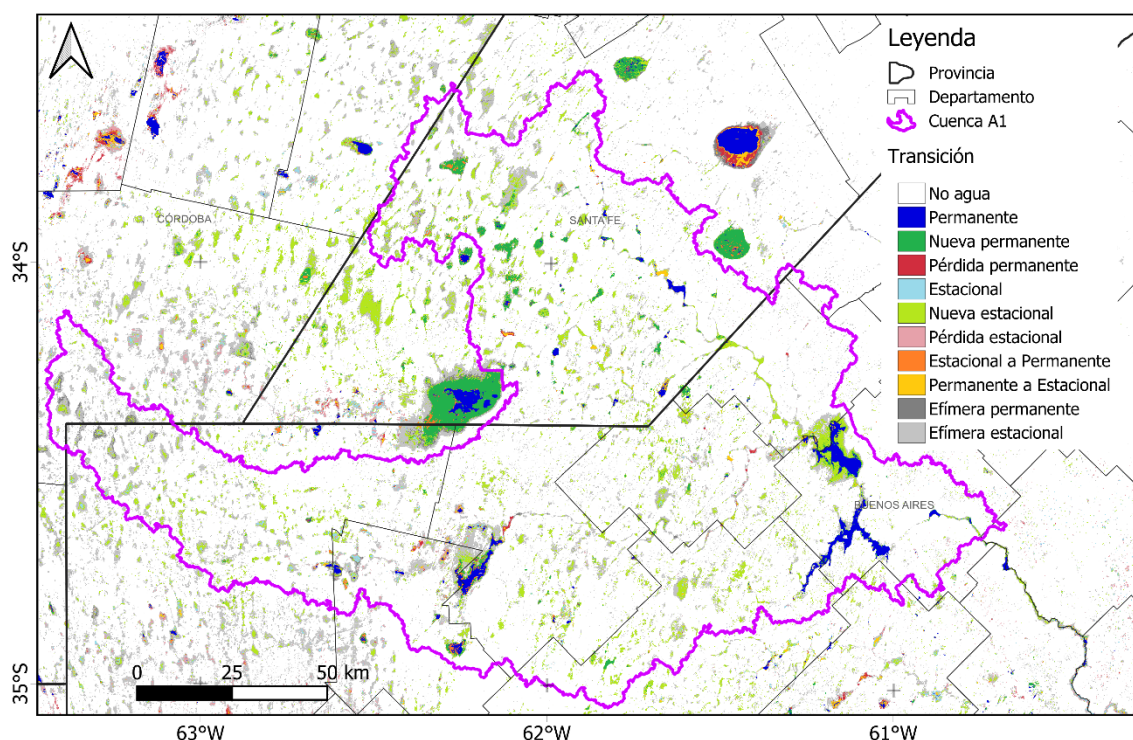


Figura 7.5 Mapa de transición del agua en la cuenca A1 (comparación 1984 versus 2020). Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. Los colores indican diferentes tipos de cambio: azul (agua permanente que persiste), verde (nueva agua estacional o permanente), amarillo/naranja (conversiones entre categorías), rojo/rosa (pérdidas de agua), gris (agua efímera).

Los resultados del mapa de la Figura 7.5 evidencian transformaciones significativas en la naturaleza de los cuerpos de agua:

- ✓ Agua permanente estable (azul oscuro): Corresponde a los núcleos de las grandes lagunas que han mantenido su condición de permanencia tanto al inicio (1984) como al final (2020) del período. Estas áreas representan los cuerpos de agua más resilientes de la cuenca.
- ✓ Nueva agua estacional (verde claro): Representa la categoría más extensa en términos de superficie. Estas áreas, que no tenían agua en 1984 pero la desarrollaron para 2020, se distribuyen ampliamente en toda la cuenca, evidenciando la expansión generalizada de zonas susceptibles a anegamiento. Este patrón es coherente con el incremento documentado en las precipitaciones y la tendencia hacia condiciones más húmedas en la región pampeana, de igual forma como lo expresan Scarpatti y Capriolo (2018).
- ✓ Nueva agua permanente (verde oscuro): Se identifica en sectores específicos, principalmente en depresiones que han transitado de condiciones secas o estacionales en 1984 a agua permanente en 2020. Este proceso puede relacionarse tanto con el incremento en las precipitaciones como con posibles modificaciones en el drenaje local asociadas a cambios en el uso del suelo o construcción de infraestructura.

- ✓ Conversión de estacional a permanente (amarillo): Se observa en áreas periféricas a algunas lagunas grandes, indicando expansión y consolidación de cuerpos de agua existentes. Este patrón sugiere que algunos sectores que experimentaban ciclos estacionales de inundación-sequía ahora mantienen agua de manera más consistente.
- ✓ Pérdida de agua permanente (rojo): Se identifica en sectores puntuales, principalmente asociados a grandes lagunas. Estas áreas podrían estar relacionadas con procesos de colmatación, modificación de cauces o alteraciones antrópicas locales.
- ✓ Pérdida de agua estacional (rosa claro): Se distribuye en sectores dispersos de la cuenca, aunque en menor proporción que las categorías de ganancia. Estas pérdidas pueden asociarse a modificaciones locales del drenaje, obras de infraestructura o cambios en el uso del suelo.
- ✓ Agua efímera (gris): Representa áreas donde el agua apareció en algún momento intermedio del período, pero no estaba presente ni al inicio ni al final. Estas zonas reflejan la alta variabilidad temporal característica de la hidrología de llanura.

Un hallazgo significativo es el claro predominio de procesos de ganancia (nuevas áreas con agua) sobre procesos de pérdida, evidenciado por la mayor extensión de tonos verdes y amarillos comparado con rojos y rosas. Este balance positivo es coherente con la tendencia climática regional hacia condiciones más húmedas durante las últimas décadas, como las expresadas por Brendel *et al.* (2021).

Se reconoce que la distribución espacial de las transiciones en la A1 no es aleatoria, sino que muestra patrones asociados a la geomorfología y posiblemente al uso del suelo. Las áreas de nueva agua se concentran preferentemente en zonas bajas y depresiones, mientras que algunas pérdidas se asocian a sectores con posible intervención antrópica.

7.3.6 Extensión máxima de agua

El producto de extensión máxima de agua (Figura 7.6) integra toda la información temporal al representar la envolvente de todas las áreas donde se detectó agua al menos una vez durante los 36 años del período analizado. Este producto binario (agua/no agua) delimita el área total susceptible a inundación.

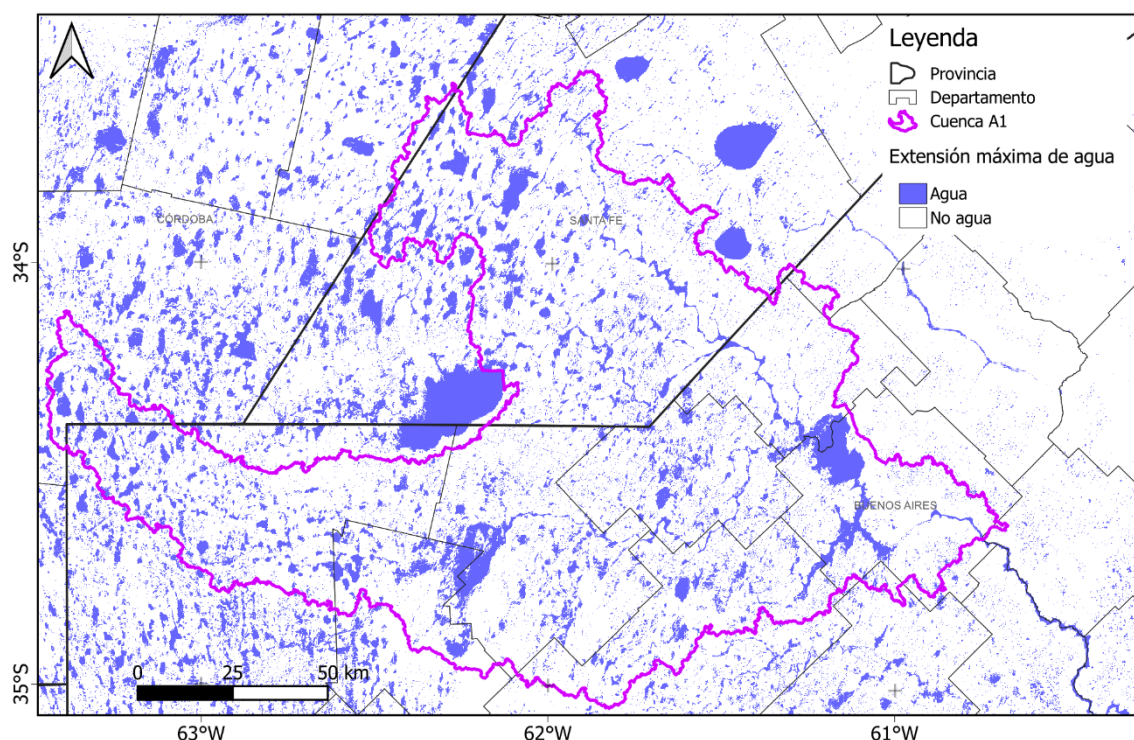


Figura 7.6 Mapa de extensión máxima de agua en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE

Nota: Se conservó la simbología propia de la plataforma de GSWE. Las áreas en azul representan todas las localizaciones donde se detectó presencia de agua al menos una vez durante el período de 36 años, delimitando la envolvente total del área susceptible a inundación.

La Figura 7.6 muestra que una proporción significativa de la cuenca A1 ha experimentado presencia de agua superficial en algún momento del período 1984-2020, identificadas como áreas con extensión máxima de agua (azul), que incluyen:

- ✓ **Lagunas permanentes y sus zonas de expansión:** Los cuerpos de agua estables más sus áreas de crecimiento durante períodos húmedos extremos.
- ✓ **Redes de drenaje:** Tanto cauces principales como secundarios, incluyendo sectores que solo conducen agua durante eventos de precipitación extrema.
- ✓ **Depresiones y áreas bajas:** Prácticamente todas las depresiones topográficas de la cuenca, incluso aquellas que solo acumulan agua durante eventos excepcionales.
- ✓ **Zonas de anegamiento temporal:** Extensas áreas de la llanura que, debido a las pendientes extremadamente bajas, son susceptibles a acumulación de agua cuando se superan los umbrales de precipitación.

La extensión del área total resulta notablemente mayor que la superficie promedio ocupada por agua en cualquier año dado, evidenciando la alta variabilidad espacial de la inundación. Como lo indican Jobbágy *et al.* (2008) esta característica es típica de las cuencas de llanura donde los cambios en el nivel de agua producen grandes variaciones en el área inundada debido a la topografía plana.

Un resultado notable fue que la distribución de las áreas susceptibles no sigue únicamente los cauces fluviales, sino que se extiende en forma de manchas dispersas y conectadas de manera difusa,

coherente con el concepto de "drenaje deficiente" característico de la pampa deprimida. Este patrón contrasta marcadamente con cuencas de mayor pendiente donde la inundación se concentra en valles fluviales definidos.

La zonificación de la información de extensión máxima resultó fundamental para la delimitación de zonas de riesgo de inundación y para la planificación del uso del suelo. Las áreas identificadas con extensión máxima de agua representan sectores donde, con base en evidencia empírica de 36 años, existe posibilidad documentada de anegamiento, constituyendo información valiosa para decisiones de localización de infraestructura, cultivos y asentamientos humanos.

7.3.7 Relación entre precipitación y extensión de agua superficial

La integración de los productos del GSWE logrados en la cuenca A1, con datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de Junín, Laboulaye y Venado Tuerto, permitió establecer relaciones cuantitativas entre la variabilidad climática y la dinámica de agua superficial.

En relación con el estudio y análisis de los datos de precipitación media anual correspondientes a las tres estaciones meteorológicas provistos por el SMN, se presenta su integración con la serie temporal completa (1984–2020) de las áreas ocupadas por las tres categorías de cobertura de agua dulce superficial (sin agua, agua estacional y agua permanente) derivadas del GSWE, tal como se observa en la Figura 7.7. Este análisis integrado permite identificar situaciones particulares, tales como:

- ❖ **Período de excesos hídricos 2012-2019:** Este período registró precipitaciones consistentemente superiores a la media histórica en las tres estaciones meteorológicas. Durante estos años la precipitación promedio alcanzó valores entre 1.100-1.300 mm anuales, superando la media histórica en 15-25%, el área sin agua se redujo drásticamente, alcanzando valores mínimos históricos (403,43 km² en 2017), el agua estacional se expandió hasta máximos históricos (1.811,31 km² en 2017) y el agua permanente aumentó significativamente (656,84 km² en 2017).
- ❖ **Eventos extremos:** El año 2017 se destaca como el de mayor precipitación del registro (promedio 1.158,6 mm entre las tres estaciones) y coincidentemente el de máxima extensión de agua superficial (~1.800 km²). Los valores de 2017 representan una reducción del 78% en área sin agua (~400 km²) respecto al promedio del período, un incremento del 250% en agua estacional respecto al promedio y del 170% en agua permanente respecto al promedio. El año 1989 refleja el mínimo histórico de agua permanente y el 2001 es el evento extremo previo con alta presencia de agua.
- ❖ **Período de sequía 1994-1996:** En contraste, este período registró precipitaciones significativamente inferiores a la media (758-901 mm). Durante estos años el área sin agua dominó la cuenca (hasta 1.469,35 km² en 1996), el agua permanente se contrajo a mínimos históricos (153,83 km² en 1996) y el agua estacional se redujo drásticamente.
- ❖ **Variabilidad interanual:** Se evidencia alta variabilidad año a año en todas las variables, con coeficientes de variación significativos, reflejando la alternancia característica entre períodos húmedos y secos en la región pampeana, en coincidencia con Scarpati y Capriolo (2013, 2018).
- ❖ **Coherencia espacial de las precipitaciones:** Las tres estaciones meteorológicas muestran patrones temporales coherentes, aunque con diferencias en magnitud absoluta. Junín (sector

este de la cuenca) consistentemente registra valores ligeramente superiores a Laboulaye y Venado Tuerto (sectores oeste y norte), coherente con el gradiente climático regional (Aliaga *et al.*, 2016). Es importante mencionar que el año 1993 presentó datos atípicos, por ello se muestra en color rojo (Figura 7.7).

El análisis particular de la Figura 7.7 permite identificar varios patrones temporales significativos como una tendencia de largo plazo con una disminución en el área sin agua, un incremento en el agua estacional u un aumento moderado en el agua permanente. Esta tendencia de largo plazo es coherente con el incremento documentado por Forte Lay *et al.* (2008) y por Scarpati y Capriolo (2018) en las precipitaciones medias anuales en la región pampeana durante las últimas cuatro décadas.

Además, se refleja una variabilidad interanual por fluctuaciones año a año de gran amplitud, con una alta sensibilidad del sistema hidrológico superficial a la variabilidad climática interanual. Las oscilaciones son particularmente marcadas en el agua estacional que muestra la mayor variabilidad absoluta, con fluctuaciones de hasta 1.500 km² entre años consecutivos y en el área sin agua solo se exhibe variaciones inversamente correlacionadas con el agua estacional.

También evidencia una relación inversamente proporcional clara entre las áreas sin agua *versus* agua estacional (correlación negativa fuerte), donde los incrementos en una se compensan con disminuciones en la otra. Esta relación refleja el proceso de transformación de áreas previamente secas en zonas anegadas durante períodos húmedos.

En comparación con las otras categorías, el agua permanente muestra menor variabilidad relativa, manteniéndose en un rango aproximado de 150-650 km². Sin embargo, exhibe una tendencia general ascendente, particularmente notable desde 2010.

Por último, se observa que períodos plurianuales húmedos o secos tienden a agruparse, sugiriendo procesos de memoria hidrológica donde las condiciones de un año influyen en el siguiente, posiblemente mediadas por el almacenamiento de agua en el suelo y los acuíferos, como lo expresa Brendel *et al.* (2021). Los datos para la elaboración de la figura se presentan en el Anexo A, y fueron obtenidos procesamiento de los productos satelitales de GSWE anuales de presencia de agua en superficie y los datos anuales del SMN.

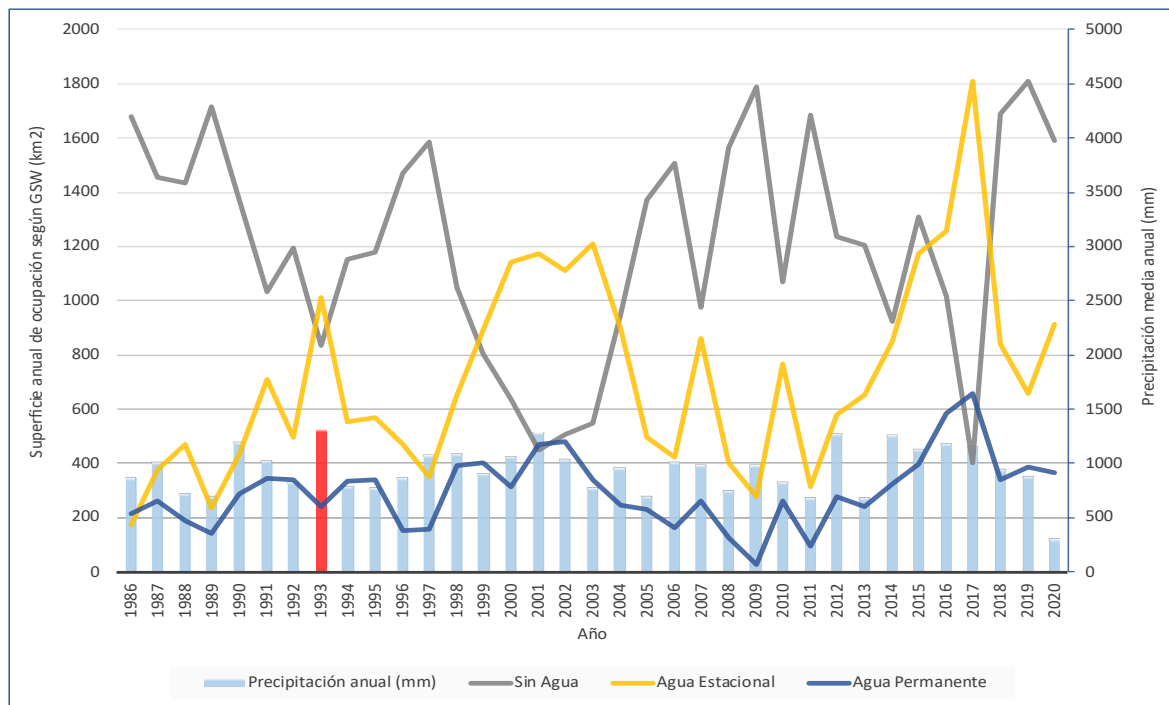


Figura 7.7 Series temporales de superficie de ocupación (km²) según categoría de agua en la cuenca A1 (1986-2020).

7.3.8 Análisis comparativo de períodos extremos: sequía *versus* excesos hídricos

La comparación entre años representativos de condiciones extremas opuestas permite evidenciar la magnitud de la variabilidad hidrológica en la cuenca A1 y cuantificar los cambios en la distribución espacial del agua superficial. La Figura 7.8 presenta una comparación visual directa entre el año 2009 caracterizado por condiciones de sequía, visualizadas en las imágenes de GSWE, a nivel anual, con la categoría No Agua, y el año 2017 como húmedo, que registró las precipitaciones más extremas del período, analizado de las tres estaciones meteorológicas del SMN, de la Figura 7.7.

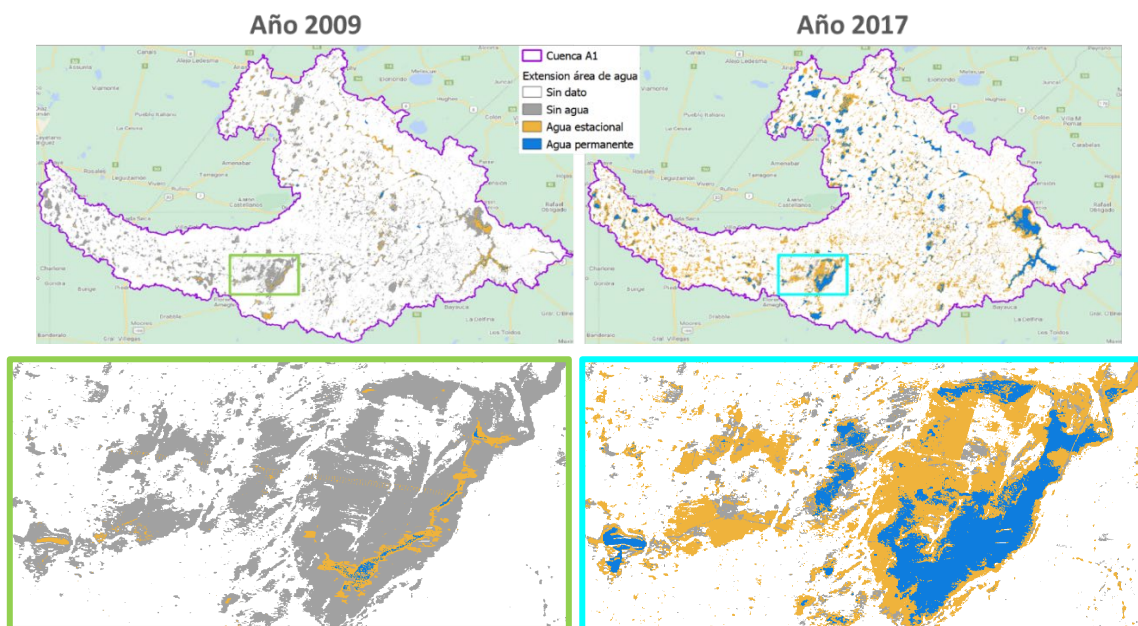


Figura 7.8 Comparación de la extensión de agua superficial entre el año 2009 (sequía) y 2017 (excesos hídricos extremos) en la cuenca A1. Fuente: Adaptado a partir de datos del GSWE.

La Figura 7.8 muestra dos mapas superiores con la cuenca A1 con la zonificación de la extensión de agua superficial y los mapas inferiores indican una ampliación de una zona representativa. El color gris claro expresa áreas sin agua, el naranja zonas con agua estacional y el azul presencia de agua permanente, evidenciando la transformación del paisaje hidrológico con incremento del 552% en agua estacional.

En comparación de los resultados alcanzados entre 2009 (sequía) *versus* 2017 (excesos hídricos) e integrando la Figura 7.7. y Figura 7.8., se presenta la Tabla 7.1, que describe la relación pluvial anual de ambos años y sus cambios absolutos.

Tabla 7.1. Precipitación anual y cobertura de agua superficial en la cuenca A1 (años 2009 y 2017).

	2009	2017	Cambios absolutos 2009–2017
Precipitación anual (mm)			
Junín	1.185,7	1.208,6	+ 22,9
Laboulaye	887,6	1.090,6	+ 203
Venado Tuerto	891,4	1.176,6	+ 285,2
Cobertura de agua superficial (km²)			
Área sin agua	1.789,47	403,43	–1.386,04 km ²
Agua estacional	277,87	1.811,31	+1.533,44 km ²
Agua permanente	27,99	656,84	+628,85 km ²

La interpretación de la Tabla 7.1 permite establecer que en el año 2009 la cuenca A1 se presenta predominantemente sin agua (tonos grises claros), donde los cuerpos de agua se limitan a unas pocas lagunas de pequeño tamaño (manchas grises oscuras y naranjas dispersas), y los sectores con agua permanente (azul) son extremadamente escasos y de extensión reducida, el agua estacional (naranja) aparece en manchas pequeñas y aisladas y en particular se observan lagunas de dimensiones muy reducidas con un pequeño núcleo de agua permanente. En el año 2017 la cuenca experimenta una transformación presentando extensas áreas cubiertas por agua, donde el agua estacional (naranja) domina el paisaje, ocupando vastas extensiones que en 2009 estaban secas, el agua permanente (azul) se expande significativamente, ocupando no solo las depresiones principales sino también sectores que en 2009 tenían agua estacional o estaban secos y se evidencia la formación de nuevos cuerpos de agua en depresiones que en 2009 estaban completamente secas.

Los patrones observados reflejan varios procesos hidrológicos característicos de ambientes de llanura durante el período analizado, interpretando la presencia de:

1. Saturación progresiva: El incremento de 22,9 mm en precipitación promedio (1,9%) resultó en un incremento de 1.533,44 km² en agua estacional, evidenciando una respuesta hidrológica altamente no-lineal. Esta amplificación se explica por la saturación progresiva del suelo durante el período húmedo 2012-2017, que incrementó la escorrentía superficial y redujo la capacidad de infiltración, en coincidencia con los datos de Brendel *et al.* (2021).
2. Expansión concéntrica: Los cuerpos de agua aumentan en número y los existentes se expanden de forma concéntrica, comenzando desde los núcleos permanentes. Este patrón es típico de

lagunas pampeanas y refleja el control topográfico sobre la distribución del agua, como lo expresan en general Bohn *et al.* (2016).

3. Conversión de categorías: Áreas que en 2009 tenían agua estacional transitaban a permanente en 2017, evidenciando que el régimen hídrico sostenido puede modificar la naturaleza de los cuerpos de agua.
4. Respuesta diferencial espacial: No todas las áreas de la cuenca respondieron de igual manera. Las zonas más bajas y con mayor conectividad hidrológica mostraron mayor incremento en agua, mientras que sectores más altos mantuvieron condiciones secas incluso en 2017.
5. Implicancias para infraestructura: La comparación evidencia que infraestructura localizada en áreas que en 2009 aparecían seguras (sin agua) puede resultar vulnerable durante eventos como 2017, destacando la importancia de considerar la variabilidad hidrológica de largo plazo en la planificación territorial.

Es importante notar que los efectos del período húmedo 2012-2019 no se revirtieron inmediatamente al finalizar las precipitaciones extremas. La memoria hidrológica del sistema, mediada por el almacenamiento en suelos y acuíferos, implica que los efectos de eventos extremos pueden persistir durante años, como lo expresan Scarpati y Capriolo (2018).

7.4 Conclusiones

La aplicación del indicador ODS 6.6.1 mediante productos del Global Surface Water Explorer permitió caracterizar de manera comprehensiva la dinámica espaciotemporal del agua superficial en la cuenca A1 del río Salado durante el período 1984-2020, proporcionando información cuantitativa fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca.

La metodología del ODS 6.6.1 demostró ser apropiada para el monitoreo hidrológico en regiones extensas con limitada infraestructura de medición *in situ*. Los productos satelitales de libre acceso, procesados mediante algoritmos estandarizados y validados internacionalmente, proporcionaron información consistente y verificable sobre la distribución espacial del agua superficial en toda la cuenca.

La información de extensión máxima de agua, derivada del análisis de 36 años de observaciones satelitales, constituye un insumo fundamental para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica desarrollada en capítulos posteriores de esta tesis. Este producto delimita objetivamente las áreas susceptibles a inundación basándose en evidencia empírica, superando las limitaciones de aproximaciones basadas únicamente en modelos topográficos o hidrológicos conceptuales.

Los productos de transición documentaron cambios significativos en el tipo de agua superficial entre 1984 y 2020, con predominio claro de procesos de ganancia (nueva agua estacional y permanente) sobre pérdidas. Esta tendencia refleja tanto la variabilidad climática de largo plazo hacia condiciones más húmedas como posibles efectos de modificaciones antrópicas en la cuenca, incluyendo cambios en el uso del suelo y construcción de infraestructura.

La integración de los productos GSWE con datos de precipitación de estaciones meteorológicas permitió establecer relaciones cuantitativas entre eventos pluviométricos extremos y respuesta hidrológica superficial. El período 2012-2019, caracterizado por precipitaciones superiores a la media

histórica, resultó en la máxima extensión de agua superficial registrada en el período analizado, evidenciando la alta sensibilidad del sistema hidrológico a variaciones climáticas.

Es importante mencionar, que las áreas identificadas con alta recurrencia de agua (>80%) requieren medidas de gestión permanentes y restricciones de uso del suelo, mientras que las zonas de recurrencia intermedia (40-70%) pueden manejarse mediante estrategias adaptativas que reconozcan la alternancia entre períodos húmedos y secos. Las áreas con baja recurrencia (<40%) representan sectores susceptibles únicamente durante eventos extremos, requiriendo planificación de contingencias, pero no necesariamente restricciones permanentes.

Los resultados evidenciaron alta variabilidad en la extensión de agua superficial a lo largo del período analizado, con incrementos del orden del 651% en agua estacional y 2.347% en agua permanente durante el evento extremo de 2017 respecto al año de sequía 2009. Esta variabilidad responde directamente a las fluctuaciones en las precipitaciones y se ve amplificada por las características geomorfológicas particulares de la cuenca, caracterizada por pendientes extremadamente bajas y densidad de drenaje reducida.

El predominio de agua estacional sobre agua permanente, evidenciado en los productos de estacionalidad y recurrencia, confirma el carácter temporal de la mayoría de los cuerpos de agua en la cuenca A1. Las áreas con recurrencia intermedia (40-70%) representan zonas de alta vulnerabilidad hidrológica donde la disponibilidad y permanencia del agua presenta incertidumbre significativa, información crítica para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Desde una perspectiva metodológica más amplia, este capítulo demuestra la complementariedad entre diferentes fuentes de información para la caracterización hidrológica de cuencas de llanura, como ser los productos GSWE que ofrecen evidencia empírica de la distribución real del agua superficial. La disponibilidad de productos satelitales actualizados periódicamente a través de la plataforma *sdg661.app* representa una oportunidad para el monitoreo continuo de la cuenca más allá del alcance temporal de esta tesis. Esta capacidad de actualización permite el seguimiento de la evolución de los ecosistemas acuáticos y la detección temprana de cambios significativos en la dinámica hidrológica, información fundamental para la gestión adaptativa de los recursos hídricos en un contexto de variabilidad y cambio climático.

En síntesis, la aplicación del indicador ODS 6.6.1 proporcionó información cuantitativa, espacialmente explícita y temporalmente extensa sobre la dinámica del agua superficial en la cuenca A1, constituyendo un componente metodológico fundamental para la evaluación integral de la vulnerabilidad hidrológica desarrollada en esta tesis doctoral. Los resultados evidencian la utilidad de integrar tecnologías de observación de la Tierra, marcos metodológicos internacionales estandarizados y datos de monitoreo local para la caracterización hidrológica de regiones de llanura y el apoyo a la toma de decisiones en gestión de recursos hídricos y planificación territorial.

La información generada mediante la aplicación del ODS 6.6.1 contribuye directamente al objetivo general de esta tesis doctoral de evaluar la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca A1 ante eventos extremos de excesos hídricos. La cuantificación de la extensión, permanencia y variabilidad del agua superficial, basada en evidencia satelital de largo plazo, proporciona una base objetiva para la identificación de áreas vulnerables y para el diseño de estrategias de gestión y adaptación. Dicha información cartográfica fue utilizada como base de datos para el capítulo 10.

En el Anexo B se presenta un caso de estudio realizado con aplicación de la metodología aplicada en el presente capítulo, que demuestra el uso de la metodología en la localidad de Junín, el cual fue presentado en el II Congreso Multidisciplinario de la UNNOBA: “Ciencia y Tecnología para el desarrollo sostenible”, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), del 2022, realizado con investigadores de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales y la de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata y con investigadores de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires..

7.5 Bibliografía

- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi Algarañaz, E. D., Bohn, V. Y., & Piccolo, M. C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280. <https://doi.org/10.18172/cig.2867>
- Bohn, V. Y., Delgado, A. L., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75, Artículo 818. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>
- Brendel, A. S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2021). Efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana (Argentina). *Revista Geográfica Venezolana*, 62(1), 92–106. <https://doi.org/10.53766/RGV/2021.62.01.03>
- Forte Lay, J., Scarpatti, O. E., & Capriolo, A. D. (2008). Precipitation variability and soil water content in pampean flatlands (Argentina). *Geofísica Internacional*, 47(4), 341-354. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692008000400004
- Jobbágy, E. G., Nosetto, M. D., Santoni, C. S., & Baldi, G. (2008). El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral*, 18(3), 305-322. https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1377
- Kruse, E., & Ainchil, J. (2017). Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: Caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *AUGM DOMUS*, 9, 1-11. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/2482>
- Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan maestro integral de la cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica. https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Quirós, R., Rennella, A. M., Boveri, M. B., Rosso, J. J., & Sosnovsky, A. (2002). Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral*, 12(2), 175-185.
- Scarpatti, O. E., & Capriolo, A. D. (2013). Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas*, (82), 38-51. <https://doi.org/10.14350/rig.31903>

Scarpati, O. E., & Capriolo, A. D. (2018). Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 79(285), 375-395.

<https://doi.org/10.3989/estgeogr.201814>

UN-Water. (2021). *Summary progress update 2021: SDG 6 – Water and sanitation for all*.

<https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-all>

United Nations Environment Programme. (2021). *Progress on Ambient Water Quality – 2021 Update*. UN-Water Integrated Monitoring Initiative for SDG 6.

https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/09/SDG6_Indicator_Report_632_Progress-on-Ambient-Water-Quality_2021_EN.pdf

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2022). *SDG indicator 6.6.1 metadata*.

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-06-06-01a.pdf>

8 EVALUACIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS APLICANDO UN MODELO AUTOMATIZADO CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GEOQ), PARA UNA CUENCA DE LLANURA BONAERENSE, ARGENTINA.¹⁷

8.1 Introducción

Gracias a la popularización de software libre para análisis geográfico, como lo es QGis®, se han implementado desarrollos en diferentes ámbitos, como lo es el hidrográfico. La modelización hidrológica es una herramienta clave para comparar los escenarios de gestión y el cambio de uso del suelo en cuencas hidrográficas (de Antueno *et al.*, 2020).

La interacción entre modelos hidrológicos y de proyección cartográfica del uso del suelo es relativamente fiable, dada por la eficacia y exactitud espacial que le otorga el manejo de bases de datos geográficos, integrados a un Sistema de Información Geográfico (SIG) (Sandoval & Oyarzun, 2004; Rodríguez Vagaría *et al.*, 2014; Gaspari *et al.*, 2019). Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a explorar los cambios de uso del suelo y sus variables sociales, económicas y espaciales; proyectar potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo; y evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo *et al.*, 2007).

8.2 Materiales y métodos

El área en estudio fue la cuenca A1 de la cuenca del Río Salado en la región Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Ubicada al noroeste de la provincia de Buenos Aires, compartiendo límites con las provincias de Córdoba y Santa Fe. Es una región de llanuras con un relieve muy suave, casi horizontal, cubierta de depresiones locales, donde las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan formando encharcamientos poco profundos y bañados, según describe el Plan Maestro del Río Salado (MOSP, 1999; Gómez *et al.*, 2017). La cuenca A1 fue delimitada mediante la corrección de un modelo digital de elevación DEM STRM, realizada por Gómez *et al.* (2017), donde se observa una zona relativamente plana con elevaciones entre 170 msnm y la menor a 50 msnm.

El objetivo fue cuantificar y zonificar la escorrentía superficial al interior de la cuenca A1, para esto se planteó una serie de modelos matemáticos implementado herramientas libres de Sistemas de Información Geográfica SIG, como lo es QGis®. Como insumos iniciales fue necesaria información espacial en formato vectorial tipo edáfica, cobertura y uso del suelo y parámetros hidrológicos como lo son el número de curva NC y precipitación zonal, como se detalla a continuación.

¹⁷ Publicado en: Montealegre Medina F.A. & F. Gaspari (2021). Evaluación de variables hidrológicas aplicando un modelo automatizado con sistemas de información geográfica (GeoQ), para una cuenca de llanura bonaerense, Argentina. III Congreso Virtual Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales "El Ambiente, los problemas ambientales y la Pos-pandemia". 8 al 18 de noviembre de 2021. La Paz, Bolivia. ISBN: 978-99905-809-9-0. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/189316>

8.2.1 Caracterización Edáfico-vegetal

El mapa de caracterización y zonificación de la cobertura vegetal y uso del suelo se adaptó de la cobertura del suelo de la República Argentina (Volante, 2009) para las clases encontradas en la cuenca A1 (Figura 8.1 (a)). Los códigos para cada clase, los cuales serán cruzados con los valores de los otros insumos en la herramienta SIG se muestran en la Tabla 8.1.

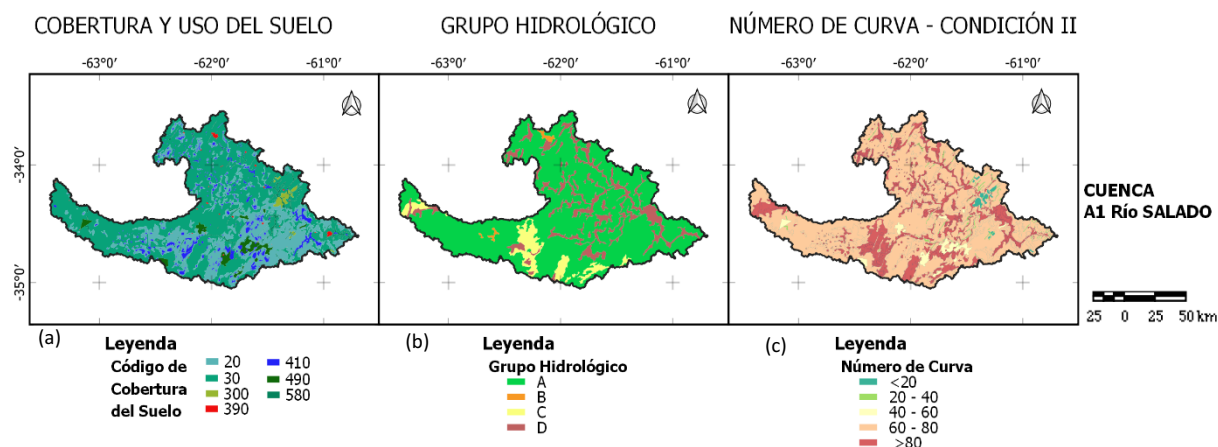


Figura 8.1. Distribución de la Cobertura y Uso del suelo (a), Grupos Hidrológicos (b) y Numero de Curva (c) en la cuenca A1.

Se requirió información del grupo hidrológico de suelo (GH), la cual se adaptó según denominación del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos SCS, a los que asignó una capacidad de infiltración según la textura, estructura y posición en el terreno similar, asignándoles el siguiente código 1: A, 2: B, 3: C y 4: D, (Figura 8.1 (b)) (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Chow *et al.*, 1994; López Cadena de Llano, 1994; Neilsen & Hjelmfelt, 1998; Mishra & Singh, 2003; Gaspari *et al.*, 2010, 2019).

Tabla 8.1. Código de las coberturas y uso del suelo para la cuenca A1.

Código	Cobertura del Suelo de la República Argentina. Proyecto PNECO 1643. Año 2006-2007
20	Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas
30	Cultivos de herbáceas graminoides
300	Bosques cerrados
390	Áreas urbanas densamente pobladas
410	Cuerpos de agua en movimiento - cañadas
490	Cuerpos de agua estacionario - bañado
580	Nieve o hielo
	Cultivos de especies arbóreas (no determinado)
	Vegas de ríos en condiciones óptimas

8.2.2 Caracterización hidro-meteorológica

La metodología del número de curva (NC) para determinar la esorrentía superficial elaborada por el Soil Conservation Service de Estados Unidos es el de mayor difusión cuando se desea obtener una adecuada aproximación (Kent, 1968; Mockus, 1972). Es una metodología empírica para el cálculo de la transformación de lluvia-esorrentía que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en

distintos tipos de suelo y para distintas condiciones de humedad antecedente. El NC presenta valores de $0 < NC < 100$. A mayor valor de número de curva las condiciones de escorrentía son más críticas, determinando menor infiltración (López Cadena de Llano, 1994; Gaspari *et al.*, 2010; Rodríguez Vagaría & Gaspari, 2010). Se calculo los valores de NC correspondientes a la cuenca A1, teniendo en cuenta que se considera una condición de humedad antecedente del suelo media (condición II) (Gaspari *et al.*, 2013), cuya distribución se muestra en la Figura 8.1 (c).

Para que se genere escorrentía es necesario una precipitación suficiente para que esta ocurra en la superficie, por tal razón se buscó evaluar el comportamiento de diferentes precipitaciones en el área de estudio. Se solicitó al Servicio Meteorológico Nación (SMN) información pluvial mensual entre el periodo 1990 al 2020 sobre la región. Las estaciones meteorológicas consultadas fueron: Junín Aero, Laboulaye Aero, y Venado Tuerto Aero, ubicadas al interior y los extremos de la cuenca A1 (Figura 6.1). Este pedido se registró en el Centro de Información Meteorológica (CIM).

La información de precipitación se organizó de forma ascendente, con el propósito de obtener los cuartiles y de esta forma encontrar los valores modales de precipitación. Se establecieron 3 escenarios: el Escenario I se escogió el valor promedio del cuartil 3 (Q3) para las tres estaciones, como lluvia modal mínima; el Escenario III es el promedio del valor del cuartil 4 (Q4), siendo los valores máximos para cada estación; el Escenario II es el promedio de los valores de los Q3 y Q4, expresando el valor de la lluvia modal media.

8.2.3 Herramienta espacial GeoQ

Teniendo los anteriores parámetros, respectivamente georreferenciados, se compilaron por medio de la herramienta SIG libre denominada QGIS®, versión 3.18, utilizando distintos procesos geoespaciales, estructurados con la herramienta del Diseñador de Modelos, generando de esta forma un complemento para dicha herramienta denominado GeoQ. Dicho complemento fue desarrollado por la cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Nacional de La Plata – Argentina, encontrándose aun en etapa de publicación oficial.

El complemento realiza cálculos para determinar la escorrentía superficial y otros parámetros hidrológicos, cruzando los registros espaciales y generando una capa geográfica, necesitando como parámetro de entrada un valor de precipitación, en milímetros, una capa de GH (suelos) y cobertura del suelo (Vegetación), al igual que una tabla con los valores de NC respecto a la condición de humedad antecedente que se quiere evaluar, con la codificación específica para realizar las uniones entre registros; arrojando como resultado una capa denominada GeoQ. La interfaz del complemento se observa en la Figura 8.2.

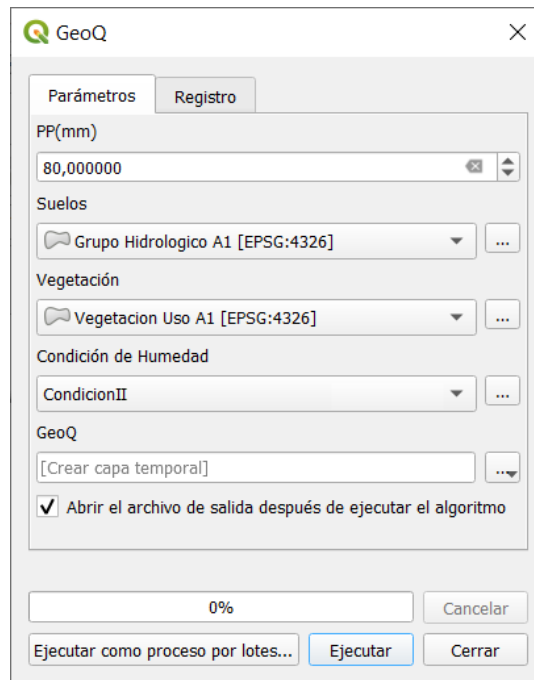


Figura 8.2. Interfaz gráfica del completo GeoQ en QGis ® 3.18

Para estudiar la vulnerabilidad hídrica, se realizó una simulación geoespacial de los tres eventos de precipitación mencionados, con la finalidad de obtener la zonificación del escurrimiento superficial (Q) y determinación del coeficiente de escorrentía (CE) para cada evento, según Ecuación 8.1, aplicando el método de NC. Este método, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972), se basa en la estimación directa del escurrimiento superficial de una lluvia aislada (P en mm) a partir de del complejo suelo-vegetación (NC) y las abstracciones iniciales (I₀ en mm), determinadas a partir de S, que es el máximo potencial de retención de la cuenca ante un evento de tormenta. El S se calcula según: (25.400 – 254 x NC) (Gaspari *et al.*, 2013).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4 \cdot I_0}$$

Ecuación 8.1

8.3 Resultados y discusión

Teniendo en cuenta las capas de GH y cobertura del suelo, se realizó un cruce con la herramienta QGis®, para determinar la superficie de ocupación de ambas capas, con el fin de evaluar la ponderación de sus características al interior de la cuenca A1 (Tabla 8.2). De esta forma es posible entender el comportamiento de la escorrentía en las diferentes áreas y su tipología. Donde predomina el grupo hidrológico A con un 79%, siendo este tipo de suelo predominantemente arenoso, con transmito fluido de agua través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedo (Díaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017), al igual que hay gran presencia de cultivos de herbáceas graminoides y vegetación frecuentemente inundada (Códigos 20 y 30), abarcando casi la totalidad del área de la cuenca de estudio.

Tabla 8.2. Superficie de ocupación según Grupo Hidrológico y Cobertura y uso del Suelo en la cuenca A1.

Código de Cobertura y uso del suelo	Superficie de ocupación (km²)					(%)
	Grupo Hidrológico					
	A	B	C	D	Total general	
20	3.262,57	38,47	649,53	865,76	4.816,33	27%
30	9.485,75	63,86	317,16	1.061,10	10.927,86	62%
300	132,75	0,00	0,00	18,51	151,27	1%
390	71,35	0,00	0,78	5,03	77,15	0%
410	410,45	4,45	121,80	386,66	923,36	5%
490	408,47	0,00	7,52	40,10	456,09	3%
580	200,12	6,16	18,59	160,69	385,56	2%
Total general	13.971,45	112,94	1.115,39	2.537,85	17.737,62	100%
% general	79%	1%	6%	14%	100%	

Para obtener los valores de precipitación con los cuales se evaluarán los 3 escenarios propuestos, se obtuvieron los cuartiles de los datos de lluvias del perdido mencionado, para cada estación meteorológica. Se definieron los valores de 33 mm (Q3) para el Escenario I (precipitación modal baja), 89 mm (Promedio entre Q3 y Q4) para el Escenario II (precipitación modal media) y 145 mm (Q4) para el Escenario III (precipitación modal alta), como se resalta en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Valores de precipitación modal por cuartiles para las estaciones pertenecientes a la cuenca A1.

Cuartil	Estación Meteorológica			
	Junín	Laboulaye	Venado Tuerto	Promedio (mm)
Q1	14,275	14,1	13,5	13,96
Q2	21,55	21,3	20	20,95
Q3	35	33	32	33,33
Q4	161,4	137	136,5	144,97
Promedio Q3 y Q4	98,2	85	84,25	89,15

Con los datos modales de las lluvias definidos, se utilizan para obtener los valores de escorrentía superficial de la cuenca A1 ejecutando el modelo GeoQ para cada escenario propuesto, obteniendo así 3 capas. Se analizó el porcentaje del Coeficiente de Escorrentía (CE) de los resultados, según el área de cruce con los insumos de entrada (Tabla 8.4). Encontrándose que en condiciones de humedad antecedente media los porcentajes de escorrentía son inferiores al 20% en los escenarios I y II, en especial en una precipitación baja en un 84% de la cuenca A1, pero para una precipitación alta, los CE oscilan entre un 40 – 60 en la mayoría de la superficie (74%).

Tabla 8.4. Rangos de CE para los Escenarios de escorrentía

Rangos CE (%)	Superficie de ocupación (km ²)					
	Escenario I		Escenario II		Escenario III	
	Área	%	Área	%	Área	%
0-20	14.232,07	80,24%	10.251,77	57,80%	741,35	4,18%
20-40	1.710,63	9,64%	3.288,68	18,54%	24,67	0,14%
40-60	871,57	4,91%	691,63	3,90%	13.110,42	73,91%
60-80	0,00	0,00%	2.582,19	14,56%	2.067,04	11,65%
80-100	923,36	5,21%	923,36	5,21%	1.794,15	10,11%
Total	17.737,63	100%	17.737,63	100%	17.737,63	100%

Los anteriores valores se plasmaron en mapas, los cuales muestran la distribución de los valores y coeficientes de escorrentía al interior de la cuenca (Figura 8.3), evidenciando que a mayor precipitación mayor es la escorrentía, teniendo en cuenta sus características edáficas y de cobertura, respondiendo de diferentes formas y acumulándose en especial en zonas bajas y con poca pendiente, al igual que hay que tener en cuenta el nivel de intervención de actividad humana, en especial en el sector agrícola.

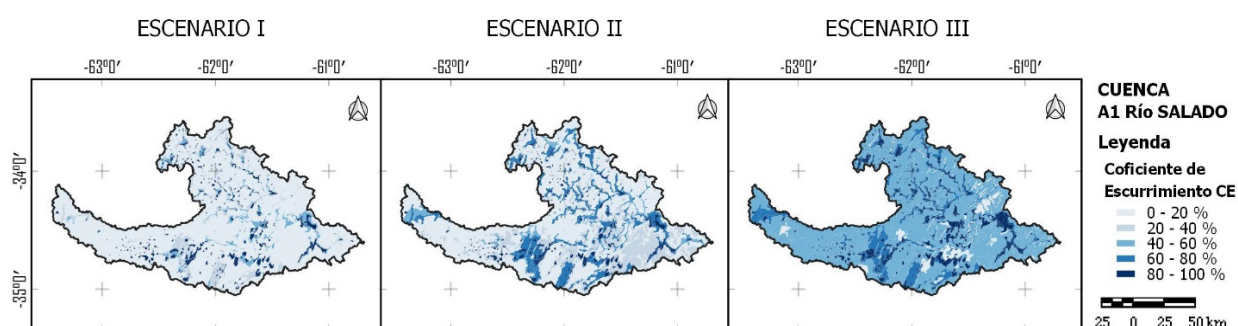


Figura 8.3. Especialización del Coeficiente de Escorrentía en la cuenca A1 para los 3 escenarios.

8.4 Conclusiones

La utilización de herramientas geográficas apotra a un mejor entendimiento del comportamiento y distribución de variables espaciales, las cuales son de gran importancia para la planificación territorial. Gracias a herramientas SIG de software libre como lo es QGis[®] es posible analizar información de forma ágil y precisa, permitiendo de igual forma automatizar procesos y cálculos matemáticos que permiten zonificar acertadamente patrones espaciales como lo son los suelos y sus coberturas, al igual que características hidrológicas de una región en particular.

Fue posible identificar áreas al interior de la cuenca A1, donde las características de los parámetros analizados en el presente trabajo ejercen mayor influencia en la generación de escorrentía superficial gracias a sus características intrínsecas, no obstante, hay que tener en cuenta condiciones iniciales como lo es la condición de humedad antecedente, la cual influye en cuan rápido se puede saturar el suelo de agua ante una precipitación determinada. Se consideró evaluar la cuenca hidrográfica con un

único valor de precipitación para cada escenario, sin embargo, hay que reconocer que la naturaleza del fenómeno no es constante toda la extensión de su territorio, debido a la gran extensión de la A1.

Se identifico zonas donde precipitaciones altas pueden generar una cantidad importante de escorrentía en la mayor parte de la cuenca, lo cual puede generar problemas de anegamiento o saturación excesiva de los cuerpos de agua presentes en la región, sumado a la baja topografía presente que evita el desagüe oportuno de grandes cantidades de agua suministradas por la lluvia. Estos datos son relevantes para la adecuada planificación de la región, para la evaluación de fenómenos extremos climáticos y así poder plantear posibles zonas de riesgo o zonificación de vulnerabilidad hidrológica en la cuenca A1.

La herramienta GeoQ está diseñada actualmente para evaluar la escorrentía de esta manera, pero se está trabajando en actualizaciones, para capturar datos de precipitación de forma heterogénea por medio de imágenes de precipitación.

La utilización de la herramienta GeoQ permite una zonificación adecuada de parámetros hidrológicos al interior de una cuenca hidrográfica, si se tienen estructuradas adecuadamente los parámetros de entrada y codificados correctamente según la tipología de número de curva, con los cuales se hará el cruce de tablas respectivos.

En el Anexo C se presenta un caso de estudio con el objetivo de generar la herramienta de procesamiento automático geoespacial GeoQ para el cálculo del escurrimiento superficial, bajo entorno QGIS. El mismo fue publicado en Environmental Studies Journal, UNICEN, Argentina, en 2021.

8.5 Bibliografía

- Aguiar, M. I., Wiegand, T., Azócar, G. D., Wiegand, K., & Vega, C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: A case study of Los Angeles, Chile. *Ecology and Society*, 12(1), Artículo 13. <https://doi.org/10.5751/ES-01970-120113>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- de Antueno, L., Gaspari, F. J., & Guzmán Guaraca, A. (2020). Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal*, 8(1), 20–42.
- Díaz Carvajal, Á. D., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 452-470. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/8920/10676>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354>
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.

- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., & Montealegre Medina, F. A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas: Herramientas de sistemas de información geográfica*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87641>
- Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: Correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>
- Kent, K. M. (1968). *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds* (SCS-TP-149). U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. <https://archive.org/details/methodforestimat149kent>
- López Cadena de Llano, F. (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. TRAGSA, TRAGSATEC, Mundi-Prensa.
- Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan maestro integral de la cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica. https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1
- Mintegui Aguirre, J. A., & López Unzu, F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (Vol. 42). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>
- Mockus, V. (1972). Section 4: Hidrology. En Soil Conservation Service (Ed.), *National engineering handbook* (p. 127). U.S. Department of Agriculture.
- Nielsen, R. D., & Hjelmfelt, A. T., Jr. (1998). Hydrologic soil group assignment. En S. R. Abt (Ed.), *Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference* (pp. 1297-1302). American Society of Civil Engineers.
- Rodríguez Vagaría, A. M., & Gaspari, F. J. (2010). Herramienta para la determinación del número de curva y escurrimiento bajo entorno SIG. Idrisi Andes®. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (10), 11–26.
- Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F. J., & Kruse, E. E. (2014). Simulación espacio-temporal del escurrimiento por la interacción entre los cambios del uso del suelo y evolución pluvial. *Revista de Tecnología. Journal of Technology*, 13, 38-48. <http://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/1839>
- Sandoval, V., & Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, (11), 9–21. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/01-sandoval-oyarzun-q11.pdf>
- Volante, J. N. (Coord.). (2009). *Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir de sensores remotos. Proyecto Específico PNECO1643, Resultados 2006-2009 (Informe Técnico Unificado)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. https://www.researchgate.net/publication/278962502_Monitoreo_de_la_Cobertura_y_el_Uso_del_Suelo_a_partir_de_sensores_remotos

9 EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS VULNERABLES POR EXCESOS HÍDRICOS EN NOROESTE BONAERENSE. ARGENTINA¹⁸.

9.1 Introducción

Las inundaciones constituyen disturbios naturales recurrentes en las áreas bajas del paisaje donde la pendiente escasa limita la evacuación de excesos de agua (Aldardasawi & Eren, 2021). La Región Pampeana Argentina es una gran planicie sedimentaria de baja elevación, íntegramente transformada a la producción agrícola (Soriano *et al.*, 1991; Viglizzo *et al.*, 2001), cuyo sistema hidrológico expresa cuencas de drenaje con baja pendiente y escurrimiento lento, que favorece la acumulación de agua superficial en períodos húmedos (Aragón *et al.*, 2011; Dornes *et al.*, 2015; Rainhart *et al.*, 2024) presentando inundaciones diversos momentos. García Hidalgo (2017), expresa que estas áreas en particular presentan vulnerabilidad del recurso hídrico, la cual es analizada considerando la susceptibilidad de la cuenca hidrográfica que la compone, para conservar y mantener el régimen hidrológico actual ante posibles alteraciones por variabilidad climática o por la acción antrópica (Anexo D).

La vulnerabilidad de una cuenca hidrográfica se define como el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos en un ambiente frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. El análisis de vulnerabilidad en las cuencas hidrográficas es un estudio técnico de diagnóstico que aporta información básica y estratégica para el plan de gestión integral del recurso hídrico (García Hidalgo, 2017).

El análisis geoespacial de la vulnerabilidad hidrológica y la generación de un mapa de amenaza de inundaciones contribuye a una adecuada gestión de amenazas y prevención de desastres (Borzi *et al.*, 2021). Dadas las recurrentes inundaciones en la provincia de Buenos Aires y los problemas que esto implica, se han realizado algunos estudios para identificar áreas de peligro de inundación (Hurtado *et al.*, 2006; Quiroz Londoño *et al.*, 2013; Borzi *et al.*, 2021). Sin embargo, estos estudios son escasos y no siempre pueden aplicarse a zonas vecinas. Esto se debe a que cada autor utiliza los datos disponibles de la cuenca a estudiar, los cuales pueden no estar registrados para otras cuencas hidrográficas.

En este contexto, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980) se ha consolidado internacionalmente como una de las metodologías más utilizadas para la evaluación de susceptibilidad a inundaciones, particularmente en regiones con escasez de datos hidrológicos primarios (Kazakis *et al.*, 2015; Ramkar & Yadav, 2021). Esta técnica multicriterio ha sido aplicada exitosamente en diversos contextos geográficos, desde cuencas mediterráneas en Grecia (Kourgialas & Karatzas, 2011) hasta ambientes urbanos en Argentina (Fernández & Lutz, 2010), demostrando su versatilidad para integrar variables heterogéneas en un marco de decisión coherente. De Brito y Evers (2016) identificaron al AHP como el método más popular en gestión de riesgos de inundación a nivel mundial, destacando su eficiencia para desarrollar métodos automatizados que cuantifican la variabilidad espacial del peligro de inundación.

En el caso de cuencas de llanura, como en el noroeste bonaerense, la disponibilidad de cartografía que represente la inundabilidad o áreas con gran potencial de acumulación de excedentes hídricos conformaría una excelente herramienta para la gestión de los recursos que la integran. La validación

¹⁸ En evaluación de la revista de la Facultad de Agronomía de la UNLP. Enviado en octubre de 2025. Montealegre Medina F. A. & Gaspari F. J. Evaluación y zonificación de las áreas vulnerables por excesos hídricos en noroeste bonaerense. Argentina.

de los mapas de susceptibilidad generados mediante AHP constituye un aspecto crítico que no siempre se implementa en estudios de este tipo (Bathrellos *et al.*, 2016). Sin embargo, la validación mediante teledetección ha demostrado ser una herramienta eficaz para corroborar la correspondencia entre las zonas de amenaza identificadas y los eventos históricos de inundación registrados. Borzi *et al.* (2021), en la cuenca del río Samborombón, validaron su mapa de amenaza de inundación utilizando imágenes Landsat del evento de mayo de 2000, obteniendo una correspondencia del 67% entre las áreas susceptibles y las zonas efectivamente inundadas. Por ello, el objetivo del presente capítulo expone una metodología hierárquica aplicada a la definición de Áreas Vulnerables a Excesos Hídricos en la cabecera de la cuenca A1.

9.2 Materiales y Métodos

Las actividades realizadas se enfocaron en el análisis de la información antecedente para profundizar en el conocimiento descriptivo cuali y cuantitativo de los recursos hídricos superficiales en relación con las áreas vulnerables a excesos hídricos (AVEH), por medio de la definición de factores que exponen a la vulnerabilidad hidrológica. Su identificación y zonificación se realizó por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), integrando información actual y datos históricos.

La investigación se centró en una subcuenca de la cabecera del río Salado, denominada por el Plan Maestro del Río Salado (Halcrow, 2017) como A1 para zonificar las AVEH.

El estudio se inició con la recopilación de información sobre clima, uso del suelo y cobertura vegetal, características edáficas y de relieve, la cual se compiló en una base de datos geoespacial que permitió realizar modelaciones hidrológicas de la cuenca.

La metodología planteada para la valoración de descriptores naturales de la AVEH en la A1 fue mediante la creación de matrices de comparación por pares propuesta por Saaty (1980). Esta técnica consiste en la toma de decisiones con criterios múltiples, proporcionando un enfoque sistemático para evaluar los impactos de diversos factores, denominada Proceso Analítico de Jerarquía, o Analytic Hierarchy Process por sus siglas en inglés (AHP) (Borzi *et al.*, 2021). El AHP es un método cuantitativo para la toma de decisiones multicriterio que permite generar escalas de prioridades basándose en juicios expertos, manifestados a través de comparaciones por pares mediante una escala de preferencia. Este método hierárquico permite valorar variables naturales o descriptores para su uso en la evaluación de peligro de inundación, y que al mismo tiempo pueda ser analizada la subjetividad del usuario, pudiendo o no rechazar la valoración efectuada.

La selección de factores condicionantes y desencadenantes para el análisis multicriterio constituye una decisión metodológica fundamental que determina la calidad de los resultados (Vojtek & Vojteková, 2019). Diversos autores han empleado entre cinco y doce factores según las características específicas de cada área de estudio. Kazakis *et al.* (2015) utilizaron siete parámetros en la región de Rhodope-Evros en Grecia, mientras que Fernández y Lutz (2010) incorporaron cinco factores en ambientes urbanos de Tucumán, Argentina. En el presente trabajo, la selección de seis factores responde a las particularidades de los ambientes de llanura pampeana, donde la escasa pendiente y la predominancia de procesos de transferencia vertical sobre los horizontales condicionan la respuesta hidrológica del sistema.

Un descriptor de factores es un código de aplicación que correlaciona las variables ambientales utilizadas en la evaluación con un sistema informático que en este caso es el Sistema de Información Geográfico (SIG) QGIS. La utilización de descriptores permite identificar un componente en el tiempo y espacio de desarrollo. Particularmente, son expresiones unívocas, controladas, normalizadas y estructuradas jerárquicamente, que representan una herramienta indispensable para la búsqueda y procesamiento de la información geoespacial.

Para su definición, se construyó una escala de valor según su grado de importancia de cada factor que incide sobre AVEH, que está caracterizado por descriptores propios. Cada uno de ellos se procesó en formato cartográfico con herramientas SIG. El procesamiento inicial se realizó por medio de matrices de pares entre los descriptores utilizados, para definir su importancia a partir del peso / valor asignado propiamente. La variabilidad entre el peso será verificada por medio de análisis estadístico de confiabilidad que se calculó por la razón de consistencia (RC). Para ello, se estimó también el índice de consistencia (IC), que depende de la matriz de comparación por pares de variables, y el índice aleatorio (IA_n) que expresa la consistencia de una matriz de comparación por pares generada aleatoriamente.

El IC es aleatorio y se calcula aplicando el método de Saaty (1980), a partir del procesamiento de una tabla de valores descriptivos de cada factor (descriptor) que se denomina matriz de pares. Los descriptores considerados fueron variables que poseen propiedades de incidencia respecto a la inundabilidad de un sitio, obteniendo como resultado final un peso numérico, en relación con su tendencia a presentar excesos hídricos.

9.2.1 Identificación y cuantificación de descriptores.

El análisis cualitativo y cuantitativo de los descriptores, obtenidos de la distribución del paisaje e interacción de los suelos y la lluvia, se realizó por medio de la implementación del programa SIG QGIS 3.x ©, conformando un modelo geoespacial basado en una objetividad biofísica, que consideró el uso y cobertura del suelo, características edáficas, topográficas y climáticas, para determinar la respuesta hidrológica ante eventos pluviales.

La metodología se compone de dos secciones principales, una que evalúa la susceptibilidad, por medio de la ponderación de factores condicionantes y desencadenantes, y la otra define la importancia relativa en el proceso, por medio de un factor de evaluación. Este enfoque metodológico permitió una estructura cuantitativa de factores que contribuyen a la vulnerabilidad ante eventos hidrológicos, proporcionando un marco claro para el análisis y la toma de decisiones en contextos de gestión de riesgos y planificación ambiental. En la Figura 9.1 se visualiza la metodología de evaluación de las variables descriptivas utilizadas según los factores analizados.

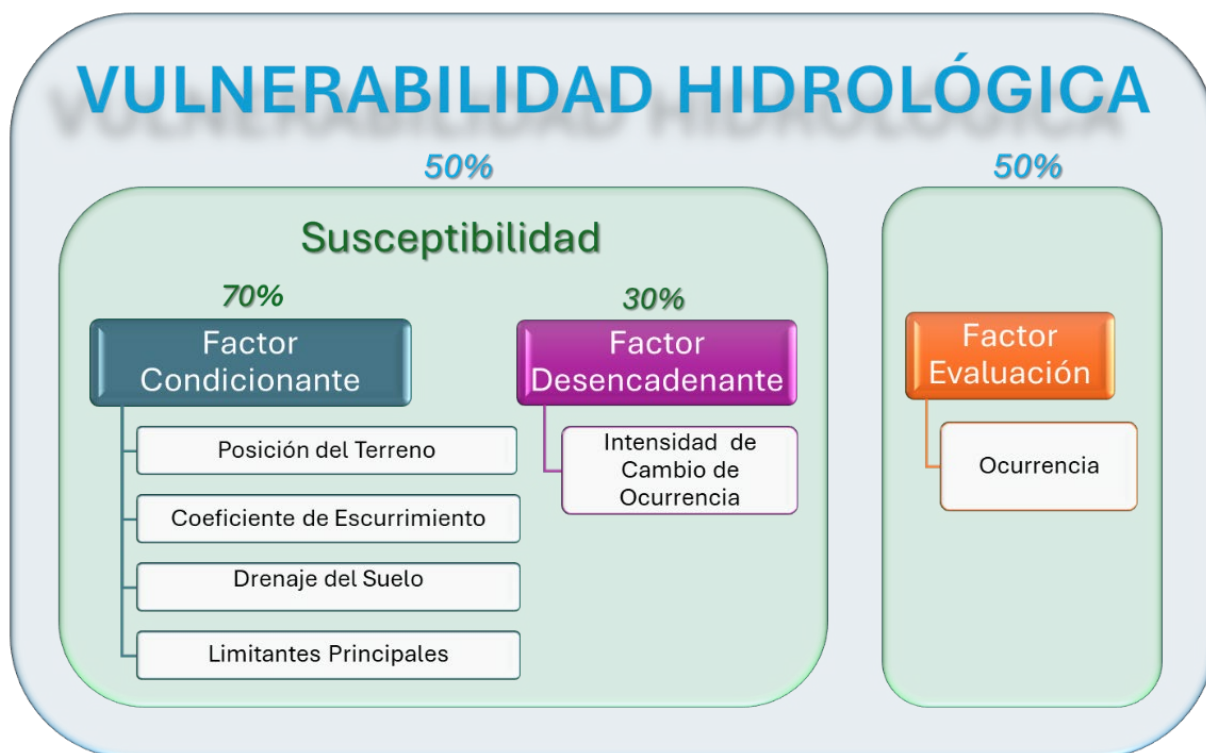


Figura 9.1. Metodología para la definición de áreas de vulnerabilidad hidrológica.

Con el fin de evaluar las áreas vulnerables a excesos hídricos en la zona de estudio, se consultó información geográfica de acceso público y que se encuentra georreferenciada y en formato vectorial, que intervienen con la dinámica hídrica como ser las características edáficas, la topografía y usos del suelo.

Los factores condicionantes utilizados fueron definidos a través de la interpretación del Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires de SAGyP-INTA (1989) y Rodríguez *et al.* (2022), en cuyo trabajo se relevó información sobre el drenaje, la posición del terreno y la limitante principal de los suelos. A continuación, se describen los factores estudiados.

- El factor **Posición del terreno** (relieve) está definida por las elevaciones o irregularidades de una superficie terrestre y determina las propiedades edáficas según ambientes, debido, además, a la influencia cobertura vegetal. A partir del procesamiento del modelo de elevación digital de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM, *Shuttle Radar Topography Mission*) (<https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>) con herramientas SIG, se analizaron las diferentes pendientes y posiciones para entender, por ejemplo, por qué determinados sectores sufren encharcamiento u otros son propensos a erosión. Estos datos se integraron a la información de la cartografía edáfica en la A1 y se clasificó este factor condicionante según la Tabla 9.1, definiendo sus descriptores.

Tabla 9.1. Descriptor de clases de posición del terreno según ambiente integrando el suelo y vegetación en A1.

Posición del terreno	Ambiente	Suelos	Vegetación
Áreas más altas, convexas o con relieve positivo	Loma Alta	Profundos, buen drenados, no salinos ni alcalinos	Pastizal con alta productividad todo el año. Reemplazado por cultivos, verdeos o pasturas
Intermedia: áreas planas extendidas	Loma	Horizonte superficial no salino ni alcalino (15-20 cm). Puede tener horizonte subsuperficial, arcilloso, alcalino y/o salino	Pastizal con buena productividad todo el año.
Áreas con relieve plano cóncavo	Planicie	No salinos en todo el perfil o alcalinos solo en profundidad. Horizonte superficial (15-20 cm) con alto contenido de materia orgánica.	Pastizal con alta productividad, bajo crecimiento en invierno.
Áreas bajas con relieve plano cóncavo. Frecuentemente anegadas	Planicie anegable	Salinos y/o alcalinos desde superficie, en todo el perfil. Horizonte superficial somero (<10 cm) y con poca materia orgánica	Pastizal adaptado a la salinidad. Baja productividad, sin crecimiento en invierno.
Planicies aluviales sobre las márgenes y cursos de agua	Cañada y vías de escurrimiento	Suelos muy someros (20 a 45 cm en total) limitados por las napas freáticas con alto contenido de sales y con anegamiento casi permanente	Pajonales de juncos, cortadera, totoras. Baja productividad, sin crecimiento invernal

- El **Drenaje** expresa como circula el agua en superficie, influenciado por la longitud y forma de la cuenca, las pendientes del cauce principal y la del terreno, como su paisaje. En el caso de las llanuras con baja pendiente, como es el caso de A1, el terreno presenta depresiones locales, donde se almacenan las precipitaciones, formando encharcamientos poco profundos y pantanosos. Al describir la disposición y tipo de drenaje se clasifican los distintos tipos de drenaje, según:
 - Pobre. El suelo permanece saturado la mayor parte del tiempo, el agua es evacuada tan lentamente que el suelo está húmedo a escasa profundidad periódicamente durante la estación de crecimiento o permanece saturado por largos períodos de tiempo.
 - Imperfecto: El agua libre o gravitante sale lentamente del suelo, el que permanece mojado por períodos significativos.
 - Moderado. el agua es evacuada del suelo con cierta lentitud en algunos períodos del año. El agua libre interna suele ser moderadamente profunda y de transitoria a permanente. Los suelos están húmedos sólo un corto período de tiempo en las raíces durante la estación de crecimiento, pero el suficiente para incidir sobre los cultivos.

- Bien drenado. El exceso de agua se retira con facilidad, pero no con rapidez. El agua libre interna es comúnmente profunda o muy profunda; de duración anual no especificada. El agua está disponible para la vegetación durante la mayor parte de la estación de crecimiento en las regiones húmedas. Los excesos de humedad no inhiben el crecimiento de las raíces.
- Algo excesivo. El agua gravitante se retira con rapidez. La presencia de agua libre interna es comúnmente muy rara o se da a mucha profundidad. Los suelos normalmente son de textura gruesa y/o son muy poco profundos.
- Se analizó el factor condicionante que define la **Limitante edáfica principal** establecida en la base de datos cartográfica del INTA, para conocer aquellas propiedades y características del medio geográfico que influyen en el desarrollo de los cultivos, es decir, aquellas que en un momento determinado influyen negativamente en el desarrollo de los cultivos y sobre los procesos de degradación del suelo por influencia antropogénica. Las limitantes principales en la A1 están definidas como: drenaje deficiente, susceptibilidad inundación – anegamiento, susceptibilidad a erosión hídrica, susceptibilidad a erosión eólica y además se encuentran áreas sin limitaciones.
- La interacción entre modelos hidrológicos y de proyección cartográfica del uso del suelo es relativamente fiable, dada por la eficacia y exactitud espacial que le otorga el manejo de bases de datos geográficos, integrados SIG (Gaspari *et al.*, 2021). El factor condicionante establecido por el **Coefficiente de escurrimiento** (CE) se analizó considerando del efecto pluvial por medio de la modelización hidrológica a nivel geoespacial. El estudio de esta dinámica hídrica superficial con SIG permitió el procesamiento automatizado de variables hidrológicas, como la relación escurrimiento-infiltración, por medio de geoprosesos. El método de cálculo utilizado fue el Número de Curva (NC) aplicando el módulo GeoQ en el software QGis ©, para obtener la distribución geoespacial de variables hidrológicas como lámina de escurrimiento, infiltración y abstracciones iniciales y sus coeficientes (Montealegre Medina & Gaspari, 2021a, 2021b). En particular, se utilizó el CE (%) que expresa la relación del escurrimiento superficial para un evento pluvial.

Los factores, desencadenante y de evaluación, fueron explicados por el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6.6.1 que describe el “cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo” y tiene por objeto reunir y suministrar datos sobre la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua y la cantidad y calidad del agua que contienen (UNEP, 2020). El Centro Conjunto de Investigación de la Comisión Europea, la división del Medio Ambiente de la ONU y Google © desarrollaron una interfaz denominada *Global Surface Water Explorer* (GSWE), en la cual presentan imágenes y mapas elaborados con *Machine Learning* sobre la distribución espacio temporal de las superficies de agua a nivel mundial, en un periodo de 38 años (1984 – 2022), con base en análisis de imágenes satelitales de los programas Landsat y Sentinel, en el marco del programa Copernicus (<https://global-surface-water.appspot.com>). Los Productos presentados en esta plataforma hacen referencia al indicador ODS 6.6.1, mostrando el cambio, ubicación y distribución de las superficies de agua, la ocurrencia del agua, el cambio de intensidad, la estacionalidad, la recurrencia, la transición y la extensión máxima del agua a nivel mundial (Pekel *et al.*, 2016).

Para el presente trabajo se consideró utilizar dos temáticas desarrolladas en dicha plataforma (<http://sdg661.app>) para caracterizar la A1 según:

- **Ocurrencia de agua** que muestra en un mapa las zonas dónde se localiza el agua superficial y proporciona información sobre la dinámica hídrica sobre el terreno. Este producto captura la variabilidad y los cambios intra e interanuales y conformó el factor de evaluación de zonificación de AVEH.
- **Intensidad del cambio de ocurrencia** es un mapa que proporciona información sobre dónde aumentó, disminuyó o permaneció igual la ocurrencia de agua superficial, documentando la dirección del cambio como su intensidad. Este mapa se muestra como factor desencadenante de la expresión de inundabilidad superficial de un área.

Los criterios seleccionados para el análisis multicriterio fueron espacializados mediante SIG, generando capas reclasificadas según su contribución a la vulnerabilidad hidrológica. Cada criterio fue categorizado en cinco clases ordinales, permitiendo su posterior integración mediante la metodología AHP. En la Figura 9.2 se puede observar la zonificación de los factores descriptivos utilizados para la modelización de la vulnerabilidad hidrológica del área de estudio A1. Los factores se clasificaron según su incidencia sobre la vulnerabilidad hidrológica, siendo condicionantes el drenaje, la posición del terreno, las limitantes principales edáficas y el coeficiente de escurrimiento. El factor desencadenante es la intensidad de cambio de ocurrencia y el factor evaluador fue la ocurrencia.

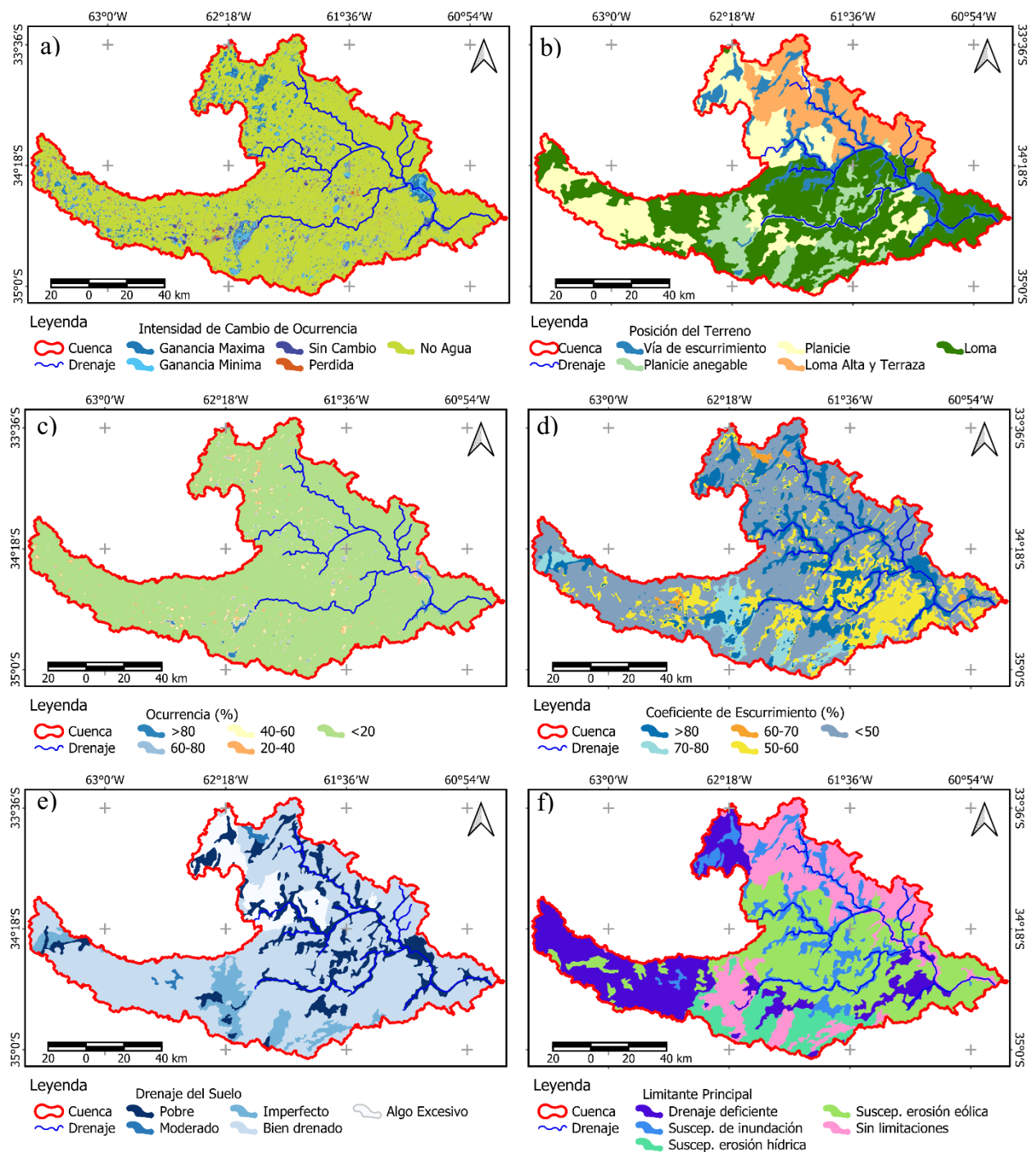


Figura 9.2. Factores y descriptores para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica en A1.

Nota: Distribución espacial de los seis criterios utilizados en el análisis multicriterio: (a) intensidad de cambio de ocurrencia de agua superficial (1984-2020), (b) posición del terreno según análisis geomorfológico, (c) frecuencia de ocurrencia de agua superficial expresada en porcentaje, (d) coeficiente de escurrimiento estimado por el método Numero de Curva, (e) clases de drenaje del suelo según cartografía edafológica del INTA, y (f) limitantes principales del territorio. Cada criterio fue reclasificado en cinco categorías ordinales para su integración mediante la metodología AHP propuesta por Saaty (1980). La red de drenaje (azul) y límite de cuenca (rojo) se muestran como referencia espacial.

Una vez definidos los factores con sus descriptores principales se realizó la aplicación de Proceso Analítico de Jerarquía (AHP) según Saaty (Saaty, 1980; Borzi *et al.*, 2021). Para ello, se asignó una escala del 1 al 9, siendo 1 el valor que identifica igual importancia entre cada par de factores o descriptores y 9 el dato que representa la mayor relevancia ente ellos con respecto a su par (Tabla 9.2). Este aspecto destaca la usabilidad de esta técnica ya que permite evaluar diferentes tipos de variables.

Tabla 9.2. Escala de valoración propuesta por Saaty (1980). Fuente: Adaptado de Vázquez Catalán (2016).

Escala	Definición	Descripción
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un criterio sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada	Un criterio es mucho más importante que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia favorece un criterio sobre el otro, es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes

La comparación de pares se realiza por medio de matrices de doble entrada para cada factor y descriptor, como se puede apreciar en el ejemplo de la Tabla 9.3. En este trabajo se realizó en 2 etapas, en la primera se evaluó la relevancia de los descriptores de cada factor definido; y en la segunda, se comparan los factores entre sí. Las matrices están compuestas por una diagonal con valor 1, cuyo valor indica que hay una comparación entre los mismos descriptores; los valores por encima de esta diagonal corresponderán a números enteros, según la escala de la Tabla 9.2, indicando el grado de importancia con respecto a los otros descriptores dentro del mismo factor, de forma ascendente hacia la derecha y hacia abajo (ej. Descriptor 1 tiene mayor relevancia que el Descriptor 5); en la parte inferior de la diagonal se disponen los números inversos correspondientes a cada par de comparación.

Tabla 9.3. Ejemplo de matriz de descriptores para un factor.

		Descriptor				
		1	2	3	4	5
Descriptor	1	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
	2	0,33	1,00	5,00	6,00	7,00
	3	0,20	0,20	1,00	3,00	5,00
	4	0,14	0,17	0,33	1,00	3,00
	5	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00
Suma		1,79	4,51	11,53	17,33	25,00
1/Suma		0,56	0,22	0,09	0,06	0,04

Una vez se obtuvieron las matrices estructuradas de los descriptores jerarquizados, se procedió a normalización, con el objetivo de generar un vector ponderado que indique la relevancia de cada uno al interior de cada factor analizado. Los valores de este vector se obtuvieron dividiendo cada valor de la matriz por la inversa de la sumatoria total de los valores de cada columna, generando una nueva

matriz con las mismas dimensiones. Posteriormente, se realizó el promedio de cada fila, adquiriendo el vector de priorización, que, en términos de porcentaje, produce los valores ponderados de cada descriptor según la jerarquización otorgada inicialmente (al sumarlos deben dar el 100% de la variable), como se ejemplifica en la Tabla 9.4.

Tabla 9.4. Matriz de normalización y vector de priorización para un factor y sus descriptores.

		Descriptor					Vector Priorización	Porcentaje (%)
		1	2	3	4	5		
Descriptor	1	0,560	0,665	0,434	0,404	0,360	0,484	48,443
	2	0,187	0,222	0,434	0,346	0,280	0,294	29,359
	3	0,112	0,044	0,087	0,173	0,200	0,123	12,321
	4	0,080	0,037	0,029	0,058	0,120	0,065	6,470
	5	0,062	0,032	0,017	0,019	0,040	0,034	3,408

En este punto fue posible utilizar el vector priorización para evaluar el grado de la vulnerabilidad hidrológica en la zona de estudio, establecido con las capas geográficas definidas. Sin embargo, la metodología de jerarquización propuesta por Saaty (1980) permite evaluar si la categorización de los descriptores es coherente para el estudio en cuestión. Para ello, se evaluó la coherencia por medio de una Relación de Consistencia (RC) (Ecuación 9.1), la cual debe ser inferior al 10% ($RC < 0,1$) para las matrices de descriptores (Vázquez Catalán, 2016) e inferior a 4% para la matriz de factores. Esto permitió establecer si los criterios implementados en la comparación por pares en las matrices fueron coherentes, y de esta forma, aceptar los pesos ponderados asignados a los atributos.

$$RC = \frac{IC}{IA_n}$$

Ecuación 9.1

Donde RC es la Relación de Consistencia, IC es el Índice de Consistencia de la matriz de comparación por pares y el IA_n es el Índice aleatorio donde n es el número de atributos o parámetros de la matriz en cuestión. Este último es un índice generado para una matriz aleatoria, el cual proviene de una consistencia aleatoria promedio obtenido de una muestra de varias matrices generadas al azar. Saaty (1980) tabuló este índice por medio de una muestra de 500 matrices generadas aleatoriamente (Saaty, 1980; Aguarón & Moreno - Jiménez, 2003). En la Tabla 9.5 se presenta la tabulación de IA obtenida de Aguarón y Moreno - Jiménez (2003) utilizada en este trabajo, siendo 5 el número de parámetros de la matriz (n).

Tabla 9.5. Índice Aleatorio (IA). Fuente: Aguarón y Moreno - Jiménez (2003).

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,570	1,583	1,595

El cálculo del IC se realizó multiplicando el valor de cada atributo de la matriz inicial (Tabla 9.3) por el valor de que le corresponde a ese atributo en vector priorización según su respectiva comparación de

pares, generando de esta forma una matriz de valores ponderados (Tabla 9.4). Con esta última matriz, se realizó la suma de cada fila para así obtener un vector de suma ponderada.

Posteriormente se dividen los valores del vector suma ponderada con respecto a los valores del vector priorización, calculados previamente en la Tabla 9.4, cuyos resultados serán sumados y divididos por n , obteniendo de esta forma el valor máximo de autovalores de la matriz de comparación de pares inicial (λ_{max}), teniendo en cuenta que $\lambda_{max} = n$, y si o si la matriz inicial es consistente, y $\lambda_{max} > n$ en el resto de las situaciones (Borzi *et al.*, 2021). Con este parámetro y n es posible calcular el valor del IC por medio de la Ecuación 9.2.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Ecuación 9.2

Con el anterior resultado se procede a calcular el valor de RC (Ecuación 9.1), para definir si los descriptores y factores establecidos en las matrices de comparación son consistentes, y de esta forma sustentar que la ponderación dada para la definición de la vulnerabilidad hidrológica en A1 es óptima, argumentando como sus componentes aportan en diferentes grados a este fenómeno estudiado.

9.2.2 Zonificación de áreas de vulnerabilidad por excesos hídricos

Realizada la ponderación de factores y sus respectivos descriptores, con la metodología adaptada de Saaty, se procedió a procesar los valores obtenidos en los vectores de priorización (Tabla 9.4), con el propósito de obtener un rango el cual refleja la importancia de cada parámetro definido en el proceso. Para ello, se multiplicó el valor del vector priorización de cada descriptor con el valor del vector priorización calculado del factor al que pertenece. De esta manera cada descriptor, y su ponderación interna, se re-escala la ponderación que tiene su respectivo factor al interior de proceso de evaluación efectuado en la metodología planteada previamente.

Debido a que la información implementada en este proceso tiene carácter geográfico, siendo capas vectoriales georreferenciadas, se realizó el anterior cruzamiento de las tablas de dichas capas. Esto se realiza por medio de las herramientas SIG, en el software QGis, asignado el valor del vector priorización a cada atributo, para luego, en otro campo, realizar la multiplicación de los valores anteriormente descritos, generando un nuevo campo cuyos valores que fueron utilizados para definir los rangos que describen las variables intervenidas.

Siguiendo la metodología propuesta en la Figura 9.1 para calcular el valor de vulnerabilidad hidrológica que aporta cada factor, se agruparon inicialmente los valores de los factores condicionantes junto con la ponderación del factor desencadenante, los cuales componen el 70% y 30 % respectivamente de la susceptibilidad a excesos hídricos en la metodología; posteriormente, esta susceptibilidad se sumó con la ponderación del factor de evaluación, para así generar el valor ponderado de vulnerabilidad por cada descriptor junto con su factor.

Con los valores ponderados asignados en las tablas de cada factor, se procedió a realizar un geoproceto de intersección de vectores entre ellos, lo cual arrojó como resultado una capa o archivo que contiene un registro por cada intersección espacial que se presentó en este proceso. Dichos valores se sumaron

en una columna adicional, cuyo resultado expresó el grado de vulnerabilidad hidrológica que aporta cada polígono de intersección.

En el anterior proceso se identificaron los valores máximo y mínimo, de todo el conjunto de datos. Estos conformaron los extremos del rango que se utilizó para evaluar la vulnerabilidad hidrológica. Al interior de este rango se definieron 4 clases de vulnerabilidad hidrológica, las cuales son Baja, Media, Alta y Muy Alta. Para delimitar la amplitud de rango de cada clase se utilizó el mayor valor de vulnerabilidad, el cual es dado por el valor máximo encontrado perteneciente al descriptor 1, siendo este el de mayor relevancia en el estudio, junto con el resultado o valor menor dado por el descriptor 5, el cual posee la menor ponderación, de esta forma se generaron los mapas la zonificación de AVEH.

En resumen, para evaluar las variables que intervienen en el estudio, se utilizaron siete matrices de comparación de pares, una para cada uno de los factores y sus descriptores analizados, donde se ordenaron las diferencias intrínsecas de cada uno, y una última matriz, donde se compararon los factores condicionantes, que proporcionaron el 70% de la susceptibilidad de inundación por excesos hídricos, siendo el otro 30%, el factor desencadenante. Esta susceptibilidad corresponde a el 50% de la ecuación, siendo el otro 50 el factor de evaluación para el cálculo de la vulnerabilidad hidrológica, como se expone en la Figura 9.1.

Con el propósito de evaluar la coherencia espacial del mapa de vulnerabilidad hidrológica generado, se implementó un proceso de validación mediante comparación con registros históricos de áreas inundadas. Siguiendo la metodología propuesta por Borzi *et al.* (2021), se utilizaron productos del Global Surface Water Explorer (GSWE) correspondientes al período de máxima extensión de agua superficial registrado en la serie temporal 1984-2020. Esta validación permitió corroborar la correspondencia entre las zonas clasificadas con alta y muy alta vulnerabilidad y las áreas con mayor frecuencia de ocurrencia de agua superficial detectada mediante teledetección.

9.3 Resultados y discusión

Aplicando la metodología AHP utilizando matrices de comparación de pares se obtuvieron los respectivos índices y relaciones de consistencia, para sustentar la ponderación asignada a cada uno de los componentes implementados en la metodología planteada para el cálculo de la vulnerabilidad hidrológica.

9.3.1 Priorización de variables

La evaluación con AHP por medio de operaciones de matrices de comparación de pares, se expone en el Anexo E.1, donde se presentan los cálculos y sus respectivos pesos o vectores de priorización de los factores condicionante, obteniendo un RC de 0,03, que al estar por debajo de 0,04, indica que la estructura de importancia asignada a estos valores en la metodología es consistente.

Posteriormente, se aplicó la AHP a los descriptores de todos los factores que intervienen en la metodología, obteniendo de esta forma los pesos o vectores priorización, junto con su respectivo RC por cada uno de los factores. El resultado del proceso matricial para esta parte está en el Anexo E.2.

En la Tabla 9.6. se presentan los resultados generales del proceso realizado con AHP aplicado a los factores y sus descriptores.

Tabla 9.6. Resumen de priorización metodológica por AHP de los factores y descriptores de la A1.

	Factor	Peso	Descriptor	Vector priorización	Relación de Consistencia (RC)
Condicionante	Posición del Terreno	0,529	Vía de Escurrimiento	0,496	0,072
			Planicie Anegable	0,255	
			Planicie	0,150	
			Lomas Altas y Terrazas	0,064	
			Loma	0,034	
	Coeficiente de Escurrimiento	0,297	>80	0,426	0,035
			70-80	0,274	
			60-70	0,162	
			50-60	0,097	
			<50	0,040	
	Drenaje	0,128	Pobre	0,484	0,084
			Moderado	0,294	
			Imperfecto	0,123	
			Bien Drenado	0,065	
			Algo Excesivo	0,034	
	Limitantes Principales	0,046	Drenaje Deficiente	0,496	0,072
			Susceptibilidad Inundación - Anegamiento	0,255	
			Susceptibilidad a Erosión Hídrica	0,150	
			Susceptibilidad a Erosión Eólica	0,064	
			Sin Limitaciones	0,034	
Desencadenante	Intensidad de cambio de ocurrencia	1,000	Ganancia Máxima	0,484	0,084
			Ganancia Mínima	0,294	
			Sin cambio	0,123	
			Pérdida	0,065	
			No Agua	0,034	
Evaluación	Ocurrencia	1,000	>80	0,484	0,084
			60-80	0,294	
			40-60	0,123	
			20-40	0,065	
			<20	0,034	

La matriz de comparaciones por pares permitió asignar un ranking de valor a las variables, así como el peso de cada una. Por otro lado, según la Tabla 9.6, RC muestra que para todos los descriptores las matrices realizadas fueron aceptadas por presentar valores inferiores a 0,1 (10%) (Saaty, 1980). Los valores de RC obtenidos para los factores (menores a 0,084 para los factores desencadenante y de evaluación, y menor a 0,03 para factores condicionantes) son consistentes con los reportados en investigaciones similares. Borzi *et al.* (2021) obtuvieron valores de RC entre 0,015 y 0,060 en la cuenca del río Samborombón, mientras que Kazakis *et al.* (2015) reportaron valores inferiores a 0,07 en su estudio de la región Rhodope-Evros. Estos resultados confirman que la asignación de pesos mediante comparación por pares fue coherente y que los criterios implementados en las matrices son conceptualmente consistentes para el fenómeno estudiado. Asimismo, no hubo diferencias importantes entre el método de vector propio y el método de media geométrica.

Con estos resultados se procedió a la asignación de cada valor de priorización a su correspondiente espacial de los descriptores, por factor, para obtener la zonificación de cada variable descriptiva según

la priorización propia en la A1, presentada en la Figura 9.3, donde se visualiza que la mayor priorización se identifica en áreas aledañas a los cursos de agua y lagunas permanentes.

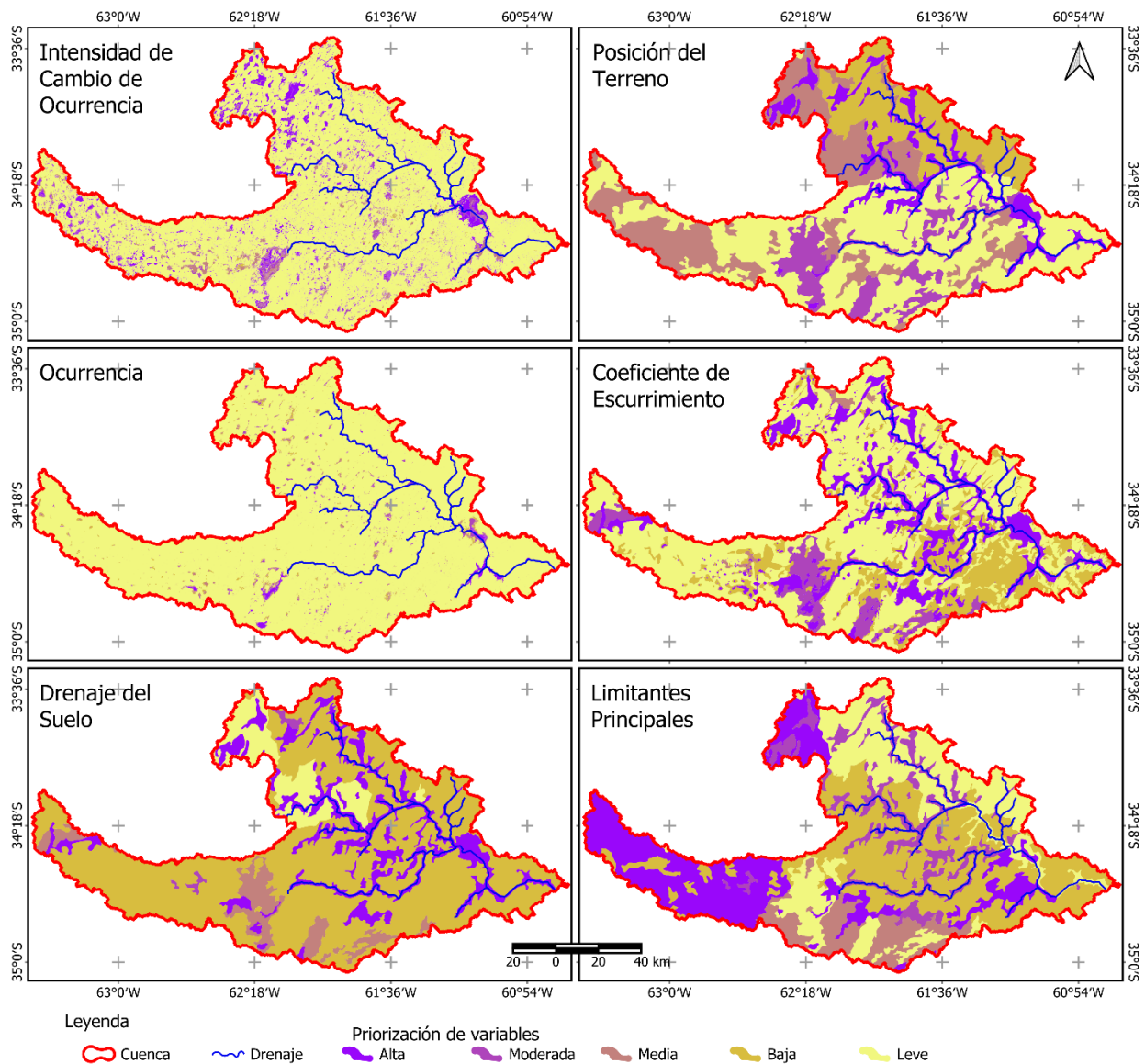


Figura 9.3. Variables descriptivas según priorización para la zonificación de vulnerabilidad hidrológica en A1.

Este patrón espacial concuerda con los hallazgos de Borzi *et al.* (2021), quienes identificaron que las áreas con mayor amenaza de inundación en la cuenca del Samborombón se corresponden principalmente con las planicies de inundación de ríos y tributarios, así como con depresiones topográficas que carecen de una red de drenaje integrada. De manera similar, Kourgialas y Karatzas (2011) destacaron que la elevación y la distancia a los cursos de agua constituyen los parámetros de mayor influencia en la determinación de áreas susceptibles a inundación. En cuencas de llanura con pendientes extremadamente bajas como la A1, donde predominan los procesos de anegamiento por saturación sobre el desbordamiento de cauces definidos (Aragón *et al.*, 2011), la posición del terreno adquiere una relevancia particular como factor condicionante de la vulnerabilidad.

Para determinar el valor de vulnerabilidad y plasmarlo en las capas espaciales de cada factor, se utilizaron los valores de los pesos calculados, tanto de los factores como los de los descriptores, compilados en la Tabla 9.6, multiplicando el valor del peso de cada factor por el valor del peso o vector priorización de sus respectivos descriptores. Esta multiplicación permitió re-escalar la importancia relativa de cada descriptor según el peso que posee su factor dentro del modelo metodológico. De esta forma, los descriptores de factores condicionantes con mayor peso (como Posición del Terreno, con 0,529) obtienen valores ponderados proporcionalmente mayores que aquellos pertenecientes a factores de menor peso (como Limitantes Principales, con 0,046); aclarando que para los factores desencadenantes y de evaluación (Ocurrencia e Intensidad de cambio de ocurrencia respectivamente) al poseer un peso con valor 1, no se re-escala el vector priorización de sus descriptores. Estos resultados se presentan en la Tabla 9.7.

Establecida la importancia de cada descriptor mediante los vectores de priorización, se procedió a aplicar la estructura de ponderación definida en la Figura 9.1. Para ello, primero se calcularon los valores escalados de cada factor multiplicando el vector de priorización de cada descriptor por el peso de su factor correspondiente, cuyos resultados se presentan en la Tabla 9.7.

El valor de vulnerabilidad hidrológica (*VH*) se calculó integrando estos valores escalados según la Ecuación 9.3.

$$VH = 0,50 \times FE + 0,50 \times [0,70 \times (PT + CE + Dr + LP) + 0,30 \times FD] \quad \text{Ecuación 9.3}$$

Donde *FE* corresponde al factor de evaluación (Ocurrencia), *PT*, *CE*, *Dr* y *LP* representan los valores escalados de los factores condicionantes (Posición del Terreno, Coeficiente de Ecurrimiento, Drenaje y Limitantes Principales respectivamente), y *FD* es el factor desencadenante (Intensidad de cambio de ocurrencia).

Los valores resultantes, mostrados en la columna derecha de la Tabla 9.7, constituyen los umbrales para la clasificación de vulnerabilidad hidrológica, según la Ecuación 9.3, los cuales oscilan entre 0,035 y 0,481.

Tabla 9.7. Escalamiento de los descriptores por factor y valor VH (Vulnerabilidad Hidrológica).

Factor Descriptor	Ocurrencia	Posición de Terreno	Coeficiente de Ecurrimiento	Drenaje	Limitantes principales	Intensidad de cambio de ocurrencia	VH
1	0,484	0,262	0,126	0,062	0,023	0,484	0,481
2	0,294	0,135	0,081	0,038	0,012	0,294	0,284
3	0,123	0,079	0,048	0,016	0,007	0,123	0,133
4	0,065	0,034	0,029	0,008	0,003	0,065	0,068
5	0,034	0,018	0,012	0,004	0,002	0,034	0,035

La definición de los rangos para la clasificación de vulnerabilidad hidrológica se fundamentó en los valores de vulnerabilidad (*VH*) calculados para cada nivel de descriptor, utilizándolos como límites naturales de las clases. Este enfoque garantiza una correspondencia directa entre la jerarquización

establecida mediante el proceso AHP y la clasificación final de vulnerabilidad, asegurando coherencia metodológica en todo el proceso de zonificación.

Los valores de vulnerabilidad obtenidos para cada descriptor conformaron los umbrales de las cuatro categorías de vulnerabilidad hidrológica, donde cada clase representa el intervalo comprendido entre dos valores consecutivos de descriptores. De esta forma, las áreas cuya vulnerabilidad calculada se aproxima al valor de un descriptor específico heredan las características ambientales asociadas a dicho nivel de priorización. En la Tabla 9.8 se presentan los rangos establecidos para la clasificación de vulnerabilidad hidrológica en la cuenca A1.

Tabla 9.8. Rangos para la clasificación de vulnerabilidad hidrológica.

Rango	Nivel de Vulnerabilidad
$0,284 \leq VH < 0,481$	MUY ALTO
$0,133 \leq VH < 0,284$	ALTO
$0,068 \leq VH < 0,133$	MEDIO
$0,035 \leq VH < 0,068$	BAJO

La clasificación de la Tabla 9.8 presenta ventajas significativas respecto al método de intervalos uniformes. En primer lugar, los umbrales derivan directamente de la ponderación jerárquica establecida mediante AHP, manteniendo la coherencia conceptual del modelo. En segundo lugar, las amplitudes de clase resultantes reflejan la distribución no lineal de los valores de priorización, donde los descriptores de mayor vulnerabilidad (1 y 2) concentran un mayor porcentaje del valor total, consistente con la escala de Saaty (1980) que asigna mayor peso relativo a los criterios de superior importancia. En tercer lugar, esta aproximación facilita la interpretación de los resultados, dado que cada clase de vulnerabilidad puede asociarse directamente con las combinaciones de descriptores que la caracterizan.

9.3.2 Zonificación de VH con geoprocésamiento

Una vez realizado el rescalonamiento de los descriptores y la definición de los rangos de nivel de vulnerabilidad se le asignaron dichos valores a los campos o atributos de las capas vectoriales correspondiente a los factores analizados (posición del terreno, coeficiente de escurrimiento, drenaje, limitantes principales, intensidad de cambio de ocurrencia y ocurrencia), mediante la edición de su tabla de atributos por medio de geoprocésamiento con QGis. Para cada factor se creó un campo numérico denominado "VP_Factor" donde se asignó el valor del vector de priorización correspondiente a cada descriptor presente en la capa. Posteriormente, se generó un segundo campo denominado "Pond_Factor" que almacenó el resultado de multiplicar el valor del vector de priorización del descriptor por el peso del factor al que pertenece, según los coeficientes establecidos en la Tabla 9.6. Este procedimiento se replicó para las seis capas temáticas, obteniéndose así la ponderación individual de cada polígono según su descriptor característico.

Con la asignación de los valores de escalados a todas las capas, se procedió a ejecutar el geoprocésamiento de intersección vectorial. Este procedimiento se realizó de forma secuencial, intersectando inicialmente las capas de los factores condicionantes entre sí, luego incorporando el factor

desencadenante y finalmente el factor de evaluación. El resultado de este proceso generó una capa vectorial compuesta donde cada polígono representa una unidad territorial homogénea caracterizada por una combinación única de descriptores de todos los factores analizados. La tabla de atributos de esta capa resultante contiene los campos de ponderación heredados de cada capa original, permitiendo identificar qué descriptor de cada factor caracteriza a cada polígono de intersección.

Sobre la capa resultante de la intersección se creó un campo adicional denominado "VH" (Valor de Vulnerabilidad Hidrológica) donde se aplicó la expresión de cálculo definida en la Ecuación 9.3 mediante la calculadora de campos de QGis. Este cálculo se ejecutó para cada uno de los registros de la tabla, generando un valor de vulnerabilidad específico para cada polígono de intersección. Los valores resultantes oscilaron entre 0,035 y 0,481, correspondiendo a las combinaciones extremas de descriptores de mínima y máxima vulnerabilidad respectivamente observados en la Tabla 9.7.

Finalmente, se procedió a clasificar los polígonos resultantes según los rangos de vulnerabilidad establecidos en la Tabla 9.8. Para ello se creó un campo categórico denominado "Clase_VH" donde se asignó la categoría correspondiente (Bajo, Medio, Alto o Muy Alto) mediante una expresión condicional que evaluó el valor del campo "VH" respecto a los umbrales definidos. La simbolización cartográfica se realizó mediante una escala cromática graduada, asignando colores fríos (verde) a las categorías de menor vulnerabilidad y colores cálidos (rojo) a las de mayor vulnerabilidad, siguiendo las convenciones establecidas para la representación de mapas de riesgo y vulnerabilidad (Tabla 9.8) (Vázquez Catalán, 2016; Borzi *et al.*, 2021).

El mapa resultante del anterior proceso representa la zonificación de áreas vulnerables a excesos hídricos (AVEH) en la cuenca A1, corroborando los resultados tabulares de las matrices de definidas en la metodología y proporcionando una herramienta de diagnóstico territorial que integra la información edáfica, uso del suelo, topográfica, hidrológica y de dinámica superficial del agua en una síntesis cartográfica orientada a la planificación y gestión del territorio, como se muestra en la Figura 9.4.

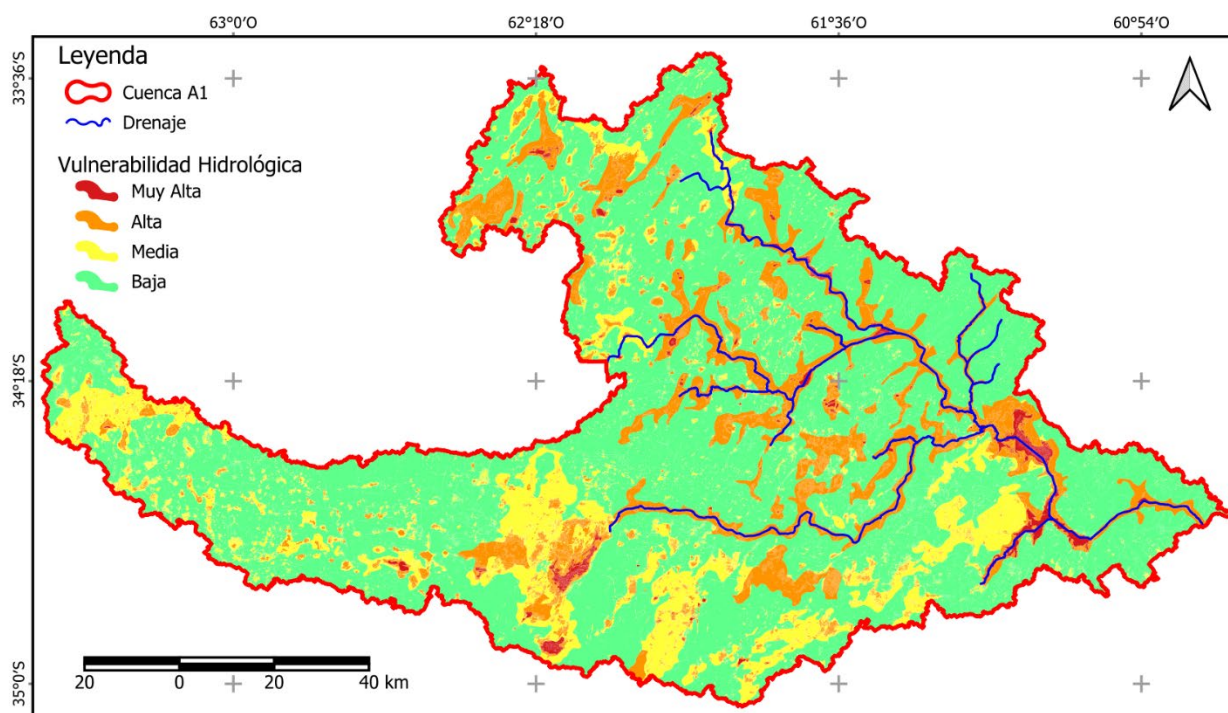


Figura 9.4. Zonificación de la vulnerabilidad hidrológica en la cuenca 1.

La predominancia de la posición del terreno como factor condicionante principal coincide con lo observado por Senisterra *et al.* (2015) en cuencas serranas de la provincia de Buenos Aires, donde este factor, junto con el uso del suelo, determinó la mayor parte de la variabilidad espacial de la vulnerabilidad ambiental. No obstante, en ambientes de llanura predominante como el estudiado, la relevancia de este factor se amplifica debido a que pequeñas variaciones altimétricas determinan la diferencia entre áreas de acumulación y áreas de transferencia de excedentes hídricos.

El coeficiente de escurrimiento, calculado mediante el método del Número de Curva, emerge como el segundo factor en importancia. Este resultado es consistente con Gaspari *et al.* (2021), quienes demostraron que la relación escurrimiento-infiltración constituye un indicador clave de la respuesta hidrológica en cuencas pampeanas, particularmente en contextos de cambio de uso del suelo. Los valores de CE superiores al 80% identificados en sectores de máxima vulnerabilidad indican condiciones donde la capacidad de infiltración del suelo se encuentra severamente limitada, ya sea por saturación previa del perfil edáfico o por características texturales restrictivas.

La incorporación de productos satelitales del Global Surface Water Explorer (GSWE) como factor desencadenante (intensidad de cambio de ocurrencia) y factor de evaluación (ocurrencia de agua superficial) constituye una innovación metodológica que vincula el análisis multicriterio con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente el indicador ODS 6.6.1. Esta integración permite no solo evaluar las condiciones físicas predisponentes a la inundación, sino también incorporar evidencia empírica de la dinámica hídrica superficial en un período de 36 años (1984-2020). Pekel *et al.* (2016) demostraron que estos productos satelitales capturan eficazmente la variabilidad intra e interanual de las superficies de agua, proporcionando información valiosa para la caracterización de zonas vulnerables a excesos hídricos.

En cuanto a las limitaciones estructurales para mitigar inundaciones en ambientes de llanura, los resultados corroboran lo señalado por Borzi *et al.* (2021), las medidas estructurales tradicionales, como la construcción de canales de drenaje, no siempre proporcionan los resultados esperados debido a la configuración extremadamente plana del terreno que imposibilita evacuar eficientemente los excedentes hídricos. Esta realidad refuerza la importancia de la zonificación de vulnerabilidad como herramienta de planificación territorial que permite orientar el desarrollo hacia áreas de menor riesgo, constituyendo una medida de bajo costo y alta efectividad comparada con las intervenciones estructurales (Fernández & Lutz, 2010).

Como resultado, se obtuvo un mapa de diagnóstico integral del medio biofísico, hidrológico y ambiental que caracteriza la vulnerabilidad de la cuenca ante eventos de precipitación extraordinarios, aportando información crucial para la planificación y gestión del territorio. La Figura 9.4 muestra que las áreas de máxima vulnerabilidad se corresponden con posiciones del terreno en vías de escurrimiento, en zonas de ganancia máxima de agua en superficie, con coeficientes de escorrentía mayores al 80%, y en presencia de drenaje del suelo pobre con la limitante principal edáfica de drenaje deficiente. La vulnerabilidad alta se corresponde a áreas conformadas por planicies anegables, susceptibles a inundación y que se corresponden a un CE de 70-80% con drenaje imperfecto. La zonificación de media y alta vulnerabilidad se presenta en áreas de planicies y lomas con menos del 20% de ocurrencia de inundación y menos del 60% de CE, siendo áreas drenaje imperfecto/deficiente y sin limitaciones edáficas o susceptible a erosión eólica, lo cual no incide sobre la vulnerabilidad hídrica.

9.3.3 Validación del modelo geoespacial para la VH

La validación del mapa de vulnerabilidad hidrológica se llevó a cabo mediante el procesamiento geoespacial con productos del GSWE, el cual presenta ventajas significativas respecto a la utilización de imágenes satelitales de eventos individuales. Borzi *et al.* (2021) validaron su mapa de amenaza de inundación utilizando imágenes Landsat del evento de mayo de 2000, mientras que, la validación de la VH en esta tesis se realizó con la capa de información que representa la extensión máxima de agua del GSWE, que integra múltiples eventos de diferente magnitud ocurridos durante 36 años, proporcionando una representación verificada de las áreas anegadas, como se presentó en el Capítulo 7. Esta aproximación es consistente con las recomendaciones de Hunter (2005) y la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación del IDEAM (2018), que destacan la importancia de validar los modelos de susceptibilidad contra registros históricos que capturen la variabilidad temporal del fenómeno.

El cruzamiento espacial entre las categorías de vulnerabilidad hidrológica y la extensión máxima de agua se realizó mediante geoprocésamiento en entorno SIG, calculando para cada clase de vulnerabilidad, el área total, el área con registro de agua superficial según GSWE, el área sin registro de agua, y el porcentaje de ocupación de agua respecto al área total, el cual se representa en la Figura 9.5 y los porcentajes de ocupación, por categoría de VH, expuestos en la Tabla 9.9.

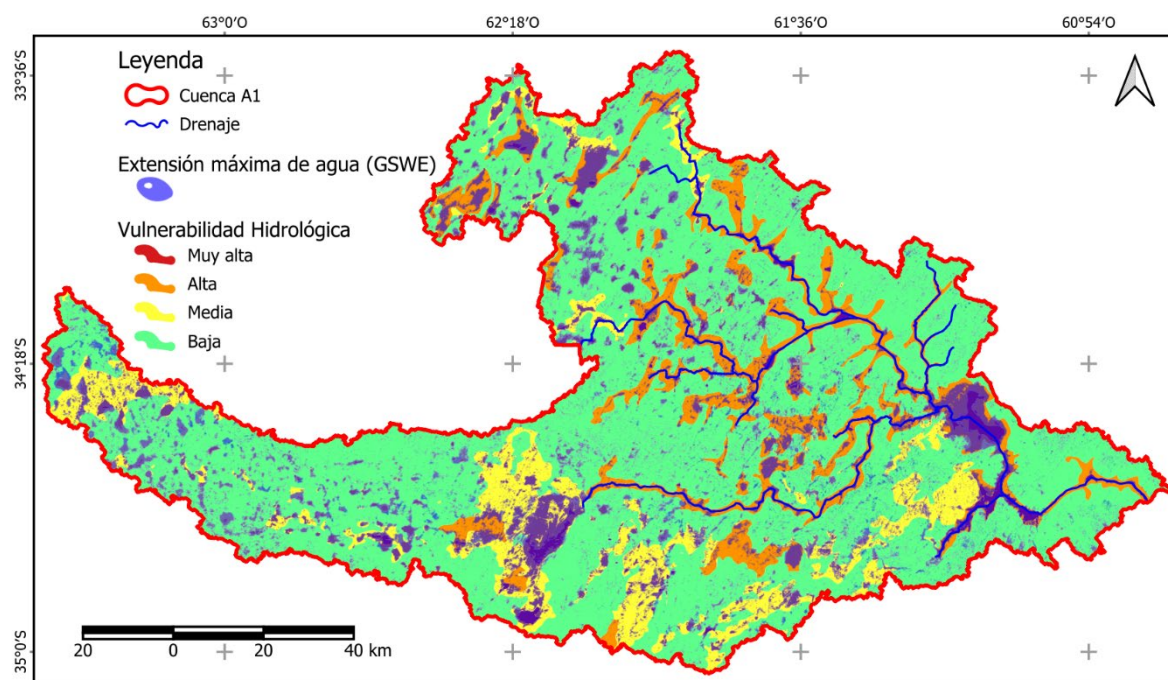


Figura 9.5. Cruzamiento de la vulnerabilidad hidrológica y la extensión máxima de agua del GSWE (1984-2020) en la cuenca A1.

Nota: Las áreas en azul representan la envolvente máxima de superficies con agua detectada por teledetección según GSWE, durante el período de análisis, manteniendo una transparencia del 60% para poder observar las áreas de vulnerabilidad que se superponen.

Tabla 9.9. Validación de la vulnerabilidad hidrológica mediante cruzamiento con la extensión máxima de agua del GSWE.

Vulnerabilidad	Área (km ²)	Extensión máxima de agua (km ²)		
		Sin agua	Con agua	% Ocupación
Muy alta	259,15	0,00	259,15	100,00
Alta	3.066,61	1.713,97	1.352,63	44,11
Media	2.747,15	1.642,41	1.104,74	40,21
Baja	11.664,72	11.496,16	168,57	1,45

En la Tabla 9.9 el porcentaje de ocupación representa la proporción del área de cada categoría de vulnerabilidad hidrológica que registró presencia de agua superficial al menos una vez durante el período 1984-2020.

Los resultados de la validación exponen un patrón de correspondencia consistente entre las categorías de vulnerabilidad asignadas por el modelo multicriterio y la presencia histórica de agua superficial detectada por teledetección. El hallazgo más significativo corresponde a la categoría de muy alta vulnerabilidad, donde el 100% del área clasificada (259,15 km²) coincide espacialmente con zonas que registraron presencia de agua superficial durante el período 1984-2020. Este resultado indica que las vías de escurrimiento y áreas de máxima acumulación identificadas mediante el análisis de factores condicionantes corresponden efectivamente a los sectores donde se concentran los excedentes hídricos durante eventos extremos.

La categoría de alta vulnerabilidad presenta un porcentaje de ocupación del 44,11%, que implica que 1.352,63 km² de los 3.066,61 km² clasificados en esta categoría registraron presencia de agua al menos

una vez durante los 36 años de observación. Este valor es coherente con la naturaleza de las planicies anegables y zonas de transición identificadas, donde la frecuencia de inundación es menor que en las vías de escurrimiento principales, pero aún significativa.

De manera similar, la categoría de vulnerabilidad media muestra un porcentaje de ocupación del 40,21% (1.104,74 km² con registro de agua), reflejando sectores con susceptibilidad intermedia donde los eventos de mayor magnitud pueden generar anegamientos temporales.

En contraste, se observa que la categoría de baja vulnerabilidad, donde únicamente el 1,45% del área (168,57 km² de 11.664,72 km² consideradas VH) registró presencia de agua superficial durante el período analizado. Este resultado valida la capacidad del modelo para discriminar efectivamente las áreas de menor susceptibilidad, correspondientes a sectores topográficamente elevados o con condiciones edáficas e hidrológicas que favorecen la infiltración sobre el anegamiento superficial.

Los resultados de validación obtenidos en el presente trabajo son comparables con los reportados en estudios similares realizados en la región pampeana y a nivel internacional. Borzi *et al.* (2021), utilizando una metodología AHP análoga en la cuenca del río Samborombón, obtuvieron una correspondencia del 67% entre las áreas de alta amenaza de inundación y las zonas efectivamente inundadas durante el evento de mayo de 2000. Si bien la métrica de validación difiere (evento único *versus* extensión máxima histórica), ambos estudios demuestran la capacidad del enfoque multicriterio para identificar correctamente las áreas susceptibles a inundación en cuencas de llanura pampeana.

A nivel internacional, los estudios de susceptibilidad a inundaciones que implementan validación mediante curvas ROC-AUC reportan valores típicamente entre 0,75 y 0,92 para metodologías basadas en AHP (Kazakis *et al.*, 2015; Vojtek & Vojteková, 2019; Ramkar & Yadav, 2021). Si bien el presente trabajo no empleó la métrica AUC debido a la ausencia de un inventario de puntos de inundación georreferenciados, el porcentaje de ocupación del 100% en la categoría de muy alta vulnerabilidad sugiere un desempeño comparable o superior, dado que la totalidad del área identificada como más vulnerable corresponde efectivamente a zonas con registro histórico de inundación.

Kourgialas y Karatzas (2011) destacaron que la validación de mapas de susceptibilidad no siempre se implementa en estudios de este tipo, constituyendo una limitación frecuente en la literatura. En este sentido, el presente trabajo contribuye a fortalecer la base empírica de los estudios de vulnerabilidad hidrológica en la región pampeana mediante la incorporación de un proceso de validación cuantitativo basado en observaciones satelitales independientes.

La integración de productos del GSWE para la validación presenta ventajas adicionales en el contexto del marco metodológico del ODS 6.6.1, permitiendo vincular la evaluación de vulnerabilidad con los indicadores globales de monitoreo de ecosistemas relacionados con el agua. Esto facilita la comparabilidad de resultados entre diferentes cuencas y escalas territoriales, aspecto relevante para la transferencia de la metodología desarrollada a otras áreas de la llanura pampeana con características similares.

9.4 Conclusiones

La aplicación del AHP para la zonificación de áreas vulnerables a excesos hídricos generó un enfoque integrador y de apoyo en la evaluación y decisión operativa para hacer frente a problemas complejos

que ofrecen una alta incertidumbre. Esta metodología de jerarquía analítica permitió ponderar las variables que pueden aceptarse o rechazarse, reduciendo los errores del usuario y establecer que la asignación de importancia de los descriptores es conceptualmente consistente.

La metodología aplicada en la cuenca A1 permitió zonificar áreas de excesos hídricos que pueden tender a inundaciones, a partir de los escasos datos disponibles, logrando además su validación mediante teledetección. El mapa resultante conformará una base de datos abierta, la cual se pondrá a disponibilidad en la web de Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE) de la Universidad Nacional de La Plata, contribuyendo como una herramienta esencial para la gestión y planificación territorial en los distritos que constituyen la cuenca, y como metodología geoespacial comprobada a utilizar en cuencas de la Llanura Pampeana, ante eventos extremos.

Los resultados alcanzados proporcionaron una forma de detección y posterior seguimiento de excesos hídricos superficiales definidos a través de los descriptores, que conforman una base de datos geoespacial de indicadores que describen características y dinámicas específicas dependiendo de la zona donde ocurren y del fenómeno natural que las causa, como ser eventos pluviales y/o desbordes de ríos.

La comparación de los resultados obtenidos con estudios similares realizados en la región pampeana (Quiroz Londoño *et al.*, 2013; Borzi *et al.*, 2021) y a nivel internacional (Kourgialas & Karatzas, 2011; Kazakis *et al.*, 2015) demuestra la consistencia metodológica del enfoque AHP aplicado y valida su pertinencia para cuencas de llanura con escasez de información hidrológica primaria. La integración de productos del Global Surface Water Explorer en el marco del indicador ODS 6.6.1 representa una innovación que vincula la evaluación de vulnerabilidad con los objetivos globales de desarrollo sostenible, facilitando la comparabilidad de resultados a diferentes escalas territoriales.

En concordancia con Borzi *et al.* (2021), la distribución espacial de la vulnerabilidad hidrológica evidencia que las zonas de mayor riesgo se concentran en las proximidades de los cursos de agua y en sectores topográficamente deprimidos. Sin embargo, a diferencia de cuencas con mayor pendiente donde la elevación constituye el factor dominante (Kazakis *et al.*, 2015), en la cuenca A1 la posición del terreno (peso = 0,529) y el coeficiente de escurrimiento (peso = 0,297) ejercen la mayor influencia sobre la vulnerabilidad, reflejando las características distintivas de los sistemas hidrológicos de llanura.

Es importante mencionar que la metodología desarrollada y los resultados alcanzados dan respuesta al último objetivo específico de esta investigación, que propone zonificar la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico para contribuir a la planificación territorial. Asimismo, se confirma la hipótesis planteada en esta tesis, demostrando que la cuantificación de indicadores hidrológicos ambientales mediante técnicas de análisis multicriterio permite efectivamente zonificar la vulnerabilidad hidrológica en áreas de llanura. La replicabilidad de esta metodología en otras cuencas de la región pampeana con características similares amplía su potencial contribución al conocimiento sobre la fragilidad de estos sistemas hidrológicos únicos.

9.5 Bibliografía

Aguaron, J., & Moreno-Jimenez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137-145.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00255-2)

- Aldardasawi, A. F. M., & Eren, B. (2021). Floods and their impact on the environment. *Academic Perspective Procedia*, 4(2), 42-49. <https://doi.org/10.33793/acperpro.04.02.24>
- Aragón, R., Jobbágy, E. G., & Viglizzo, E. F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), 433-447. <https://doi.org/10.1002/eco.149>
- Bathrellos, G. D., Karymbalis, E., Skilodimou, H. D., Gaki-Papanastassiou, K., & Baltas, E. A. (2016). Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), Artículo 319. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1>
- Borzi, G., Roig, A., Tanjal, C., Santucci, L., Tejada Tejada, M., & Carol, E. (2021). Flood hazard assessment in large plain basins with a scarce slope in the Pampean Plain, Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Artículo 177. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08988-1>
- De Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1019-1033. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016>
- Dornes, P., Mariño, E., & Schulz, C. (2015). *Inventario de los recursos hídricos de la provincia de La Pampa*. UNLPam-Consultora.
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- García Hidalgo, Y. (2017). Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico con fines de riego en la Cuenca Hidrográfica del Río Naranjo, Cuba. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 315-330. <https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.13>
- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., & Montealegre Medina, F. A. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1), 74-112.
- Halcrow. (2017). *Plan maestro integral de la cuenca del Rio Salado: Evaluación de impacto ambiental*. Ministerio del Interior. <https://www.mininterior.gov.ar/licitaciones/descargar.php?i=38233>
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., & Wilson, M. D. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, 90(3-4), 208-225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.021>
- Hurtado, M. A., Giménez, J. E., Cabral, M. G., da Silva, M. M., Martínez, O. R., Camilión, M. C., Sánchez, C. A., Muntz, D., Gebhard, J. A., Forte, L. M., Boff, L. D., Crincoli, A., & Lucesoli, H. (2006). *Análisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial*. Consejo Federal de Inversiones. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/book/275>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. Subdirección de Hidrología, Centro Nacional de Modelación. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/guia_metodologica_para_la_elaboracion_de_mapas_de_inundacion.pdf
- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros

region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—A case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212-225.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>

Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021a). Evaluación de variables hidrológicas aplicando un modelo automatizado con sistemas de información geográfica (GeoQ), para una cuenca de llanura bonaerense, Argentina. En *III Congreso Virtual Desarrollo Sustentable y Desafíos Ambientales "El Ambiente, los problemas ambientales y la Pos-pandemia"*, La Paz, Bolivia.

<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/189316>

Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021b). GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGIS®. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 9(2), 170–192. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1289>

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.

<https://doi.org/10.1038/nature20584>

Quiroz Londoño, O. M., Grondona, S. I., Massone, H. E., Farenga, M. O., Martínez, G. A., & Martínez, D. E. (2013). Modelo de anegamiento y estrategia de predicción-prevención del riesgo de inundación en áreas de llanura: El sudeste de la provincia de Buenos Aires como caso de estudio. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 13(1), 76-98.

<https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/262>

Rainhart, L., Peinetti, H. R., & Noellemeyer, E. J. (2024). Las inundaciones de las últimas tres décadas en la Pampa Interior y su relación con la pluviometría regional. *Ecología Austral*, 34(1), 121–133.

<https://doi.org/10.25260/EA.24.34.1.0.2374>

Ramkar, P., & Yadav, S. M. (2021). Flood risk index in data-scarce river basins using the AHP and GIS approach. *Natural Hazards*, 109, 1119-1140. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04871-x>

Rodríguez, D. M., Schulz, G., & Tenti Vüegen, L. M. (2022). *Cartas de suelos de la provincia de Buenos Aires*. Instituto de Suelos (CIRN), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA].

<http://hdl.handle.net/20.500.12123/12102>

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [SAGyP-INTA]. (1989). *Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires* (Escala 1:500.000) [Proyecto PNUD ARG/85/019]. <https://searchworks.stanford.edu/view/2116475>

Senisterra, G. E., Gaspari, F. J., & Delgado, M. I. (2015). Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*, 3(1), 38-58.

<https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v3i1.1047>

Soriano, A., León, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R., Deregibus, V. A., Cahuepé, M. A., Scaglia, O. A., Velázquez, C. A., & Lemcoff, J. H. (1991). Río de la Plata Grasslands. En R. T. Coupland (Ed.),

Ecosystems of the world. Natural grasslands. Introduction and Western Hemisphere (pp. 367-407). Elsevier.

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2020). *Change in the extent of water-related ecosystems over time: Methodology for SDG Indicator 6.6.1.*

https://files.habitatseven.com/unwater/SDG-indicator-661-methodology_Spanish.pdf

Vázquez Catalán, S. (2016). *Cartografía de vulnerabilidad por fragilidad frente a seísmos para la ciudad de Huaral (Perú)* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional de Documentos - Zeguan. <https://zaguan.unizar.es/record/58595>

Viglizzo, E. F., Lértora, F. A., Pordomingo, A. J., Bernardos, J., Roberto, Z. E., & del Valle, H. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83(1), 65-81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00155-9)

Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water*, 11(2), Artículo 364. <https://doi.org/10.3390/w11020364>

10 CONCLUSIÓN

La presente tesis doctoral abordó la identificación y evaluación de la vulnerabilidad hidrológica producida por eventos extremos de exceso hídrico superficial en la cuenca A1 del río Salado, ubicada en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. A lo largo de los capítulos precedentes se desarrollaron metodologías específicas, donde se aplicaron técnicas de análisis geoespacial y se generaron productos cartográficos que permitieron comprender la dinámica hidrológica de un sistema de llanura y su vulnerabilidad ante eventos extremos de precipitación.

El desarrollo de esta investigación implicó la integración de múltiples fuentes de información, incluyendo datos hidrometeorológicos históricos, imágenes satelitales de diversos sensores remotos, modelos digitales de elevación corregidos, información edafológica y de uso del suelo, así como relevamientos de campo mediante técnicas de posicionamiento GPS. Esta aproximación multidisciplinaria permitió caracterizar de manera comprehensiva el comportamiento hidrológico de una cuenca con características distintivas propias de los ambientes de llanura pampeana: pendientes extremadamente bajas (0,90%), densidad de drenaje muy reducida (0,03 km/km²), identificación de procesos de infiltración y áreas de excesos hídricos con anegamiento superficial.

Es pertinente destacar que varios de los capítulos que conforman esta tesis constituyen trabajos publicados en revistas científicas indexadas y presentados en congresos nacionales e internacionales, habiendo sido sometidos a procesos de revisión por pares académicos. Esta circunstancia otorga una validación adicional a los resultados presentados y evidencia la contribución de esta investigación al avance del conocimiento científico en la temática.

El objetivo general de esta tesis propuso identificar y evaluar la vulnerabilidad hidrológica producida por la presencia de eventos extremos de exceso hídrico superficial en el noroeste bonaerense. Este objetivo fue alcanzado de manera integral mediante el desarrollo de una metodología que combinó análisis morfométrico, modelación hidrológica, teledetección satelital y evaluación matricial de multicriterio, cuyos resultados se materializaron en un mapa final de zonificación de vulnerabilidad hidrológica para la cuenca A1. La zonificación obtenida clasificó los 17.737,63 km² de la cuenca A1 en cuatro categorías de vulnerabilidad hidrológica: muy alta (259,15 km², 1,46%), alta (3.066,61 km², 17,29%), media (2.747,15 km², 15,49%) y baja (11.664,72 km², 65,76%). La validación mediante cruzamiento espacial con la extensión máxima de agua del Global Surface Water Explorer (período 1984-2020) demostró una correspondencia del 100% en la categoría de muy alta vulnerabilidad, donde la totalidad del área clasificada coincidió con zonas que registraron presencia de agua superficial durante el período analizado.

El primer objetivo particular se cumplió mediante el desarrollo de los capítulos 2 y 4, donde se estableció la delimitación precisa de la cuenca A1 y se realizó una caracterización integral de sus componentes geográficos y ambientales. La cuenca A1, se localiza en la Pampa húmeda bonaerense y se extiende sobre 15 partidos del noroeste provincial. La caracterización reveló que el área corresponde a la ecorregión Pampa, con predominio de la Pampa Arenosa (D27, 52%) y la Pampa Endorreica (D28, 47%), caracterizadas por un relieve de llanura. La caracterización ambiental incluyó el análisis de variables climáticas, edafológicas, de uso y cobertura del suelo, y de posición del terreno. Se determinó que el uso del suelo predominante corresponde a actividades agropecuarias (agricultura y pastizales), con precipitaciones medias anuales entre 900 y 1100 mm. El análisis de la posición del terreno, fundamental para comprender la dinámica hídrica en ambientes de llanura, identificó las vías

de escurrimiento, planicies anegables y sectores elevados que condicionan la redistribución del agua superficial durante eventos de precipitación.

El segundo objetivo fue abordado principalmente en los capítulos 5 y 7, complementado con información detallada en el anexo correspondiente. Se procesaron datos pluviométricos de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (datos obtenidos por convenios específicos) y de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI), junto con información satelital de los productos TRMM y GPM obtenidos mediante la plataforma Giovanni de NASA. El análisis temporal permitió identificar el período 2012-2019 como el de mayor extensión de agua superficial registrada en 36 años de observaciones satelitales, coincidiendo con precipitaciones superiores a la media histórica. La integración de datos pluviométricos con los productos del Global Surface Water Explorer evidenció la alta sensibilidad del sistema hidrológico de la cuenca A1 a las variaciones climáticas, con incrementos de hasta 552% en la extensión de agua estacional entre años secos y húmedos. Esta variabilidad extrema, amplificada por las características geomorfológicas de la cuenca (pendientes bajas, densidad de drenaje reducida), constituye un factor determinante de la vulnerabilidad hidrológica del territorio.

El tercer objetivo constituye una de las contribuciones metodológicas más significativas de esta tesis, materializada en el desarrollo del complemento GeoQ para el software libre QGIS, presentado en el capítulo 8 y detallado en el Anexo C. GeoQ implementa la metodología del Número de Curva (NC) del Soil Conservation Service para la modelación espacial del fenómeno precipitación-escorrentía, permitiendo calcular y zonificar el coeficiente de escorrentía (CE), la capacidad de infiltración (CI), las abstracciones iniciales (I_0) y la capacidad de campo (CF) bajo tres condiciones de humedad antecedente. La herramienta GeoQ fue validada en cuatro cuencas testigo con diferentes características topográficas y edáficas: la cuenca del arroyo Napaleofú, del arroyo Pillahuincó Grande, del arroyo Pillahuincó Chico y la cuenca A1. Los resultados demostraron la capacidad del modelo para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico tanto en cuencas serranas como de llanura, generando cartografía de variables hidrológicas interpretable y aplicable para la planificación territorial.

El impacto de GeoQ trasciende el ámbito de esta tesis doctoral. La publicación del complemento en el repositorio oficial de QGIS (versión 1 en octubre 2020; versión 2.8 actualizada en noviembre de 2024) ha permitido su acceso libre a la comunidad científica internacional, registrando 2.736 descargas a la fecha. Asimismo, la publicación del artículo en la Revista Estudios Ambientales (Montealegre Medina & Gaspari, 2021) y su presentación en el XXVII Congreso Nacional del Agua (CONAGUA 2023) evidencian la adopción de la herramienta por otros investigadores y su aplicación en nuevos estudios de caso, como el modelado de escorrentía superficial en proyectos de investigación de la Universidad Nacional de La Plata, la Universidad Nacional de Centro de La Provincia de Buenos Aires, Comité de Cuenca del Río Reconquista, entre otros, y en trabajos finales de carrera y pasantías de investigación de esta facultad, y becarios de intercambio con alumnos internacionales.

El cuarto objetivo fue alcanzado mediante la aplicación de técnicas de teledetección desarrolladas en los capítulos 5, 6, 7 y el Anexo B. Se utilizaron productos del Global Surface Water Explorer (GSWE) que integran 36 años de observaciones satelitales (1984-2020) de los programas Landsat y Sentinel, en el marco metodológico del indicador ODS 6.6.1 de Naciones Unidas. El análisis de los productos GSWE (extensión máxima, recurrencia, estacionalidad y transición) permitió delimitar objetivamente las zonas históricamente afectadas por presencia de agua superficial. Se identificó que el predominio de agua estacional sobre agua permanente caracteriza la dinámica hídrica de la cuenca A1, con áreas de

recurrencia intermedia (40-70%) que representan zonas de alta incertidumbre en la disponibilidad y permanencia del agua. Los productos de transición documentaron cambios significativos entre 1984 y 2020, con predominio de procesos de ganancia (nueva agua estacional y permanente) sobre pérdidas, reflejando tanto la variabilidad climática de largo plazo hacia condiciones más húmedas como posibles efectos de modificaciones antrópicas en la cuenca.

El Anexo B, derivado del capítulo 7, integró la información altimétrica obtenida mediante GPS cinemático con los productos GSWE para evaluar la vulnerabilidad y transitabilidad de la red vial rural en el partido de Junín. Este caso de aplicación demostró que aproximadamente el 20-25% de los caminos rurales relevados (100-150 km) presentan vulnerabilidad alta que requiere priorización para obras de mejoramiento, evidenciando la utilidad práctica de la metodología desarrollada para la gestión municipal.

El quinto objetivo se cumplió mediante el desarrollo de los capítulos 3 y 9, donde se cuantificaron y espacializaron los indicadores que conforman la evaluación de vulnerabilidad hidrológica. El capítulo 3 estableció la caracterización morfométrica de la cuenca A1 y sus cinco subcuencas, calculando parámetros de forma, relieve y drenaje que permitieron jerarquizar las subcuencas según su fragilidad morfométrica mediante el índice de Prioridad de Conservación Morfométrica (PCM). La subcuenca 3 fue identificada como de alta prioridad (PCM = 1,57), caracterizada por su forma más compacta y mayor densidad de drenaje relativa, mientras que las subcuencas 1 y 4 presentaron baja prioridad debido a sus formas muy alargadas que favorecen la atenuación de crecidas. El capítulo 9 desarrolló la cuantificación de indicadores específicos de vulnerabilidad hidrológica basándose en la metodología propuesta por Saaty (1980). Se definieron seis factores espacializados mediante SIG: posición del terreno (peso = 0,529), coeficiente de escurrimiento derivado de GeoQ (peso = 0,297), clases de drenaje del suelo (peso = 0,128), limitantes principales edáficas (peso = 0,046), intensidad de cambio de ocurrencia del agua (factor desencadenante, 30%) y ocurrencia de agua superficial (factor de evaluación, 50%). La consistencia de las matrices de comparación de pares fue verificada mediante el índice de consistencia, obteniéndose valores de RC < 0,1 en todos los casos, que garantiza la coherencia lógica de las ponderaciones asignadas.

El sexto objetivo, que propone la integración de los capítulos antecedentes para zonificar la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico y contribuir a la planificación territorial, fue alcanzado en el capítulo 9 mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La integración de los factores condicionantes (70% de susceptibilidad) y el factor desencadenante (30%) con el factor de evaluación (50% de la ecuación final) generó un mapa de zonificación que clasifica el territorio de la cuenca A1 según su grado de vulnerabilidad ante excesos hídricos. Los resultados de la zonificación presentan coherencia espacial y temática: las áreas de muy alta vulnerabilidad (259,15 km²) se localizan en vías de escurrimiento con coeficientes de escorrentía superiores al 80%, drenaje pobre y ganancia máxima de agua superficial; las zonas de alta vulnerabilidad (3.066,61 km²) corresponden a planicies anegables susceptibles a inundación; las áreas de vulnerabilidad media (2.747,15 km²) presentan condiciones intermedias en planicies y lomas; mientras que las zonas de baja vulnerabilidad (11.664,72 km²) ocupan sectores topográficamente elevados con condiciones favorables para la infiltración. La validación del modelo mediante cruzamiento con la extensión máxima de agua del GSWE (1984-2020) demostró que: el 100% de la categoría muy alta registró presencia histórica de agua, el 44,11% de la categoría alta, el 40,21% de la categoría media, y únicamente el 1,45% de la categoría baja. Estos porcentajes de ocupación decrecientes confirman la capacidad discriminante del modelo para diferenciar áreas según su

susceptibilidad real a excesos hídricos, proporcionando información técnica confiable para la planificación territorial y la gestión del riesgo hidrológico en la región pampeana.

La hipótesis de esta tesis planteó que la cuantificación de indicadores hidrológicos ambientales permite zonificar la vulnerabilidad hidrológica ante eventos extremos de exceso hídrico en áreas de llanura. Los resultados obtenidos confirman plenamente esta hipótesis. La cuantificación sistemática de indicadores (morfométricos, hidrológicos, edafológicos, de uso del suelo y derivados de teledetección) mediante técnicas de análisis multicriterio permitió generar una zonificación de vulnerabilidad hidrológica validada empíricamente. El porcentaje de correspondencia del 100% entre las áreas clasificadas como de muy alta vulnerabilidad y las zonas con registro histórico de inundación durante 36 años de observaciones satelitales constituye evidencia robusta de que los indicadores seleccionados y su ponderación mediante AHP capturan adecuadamente los factores que determinan la susceptibilidad a excesos hídricos en ambientes de llanura pampeana.

Es importante destacar que la confirmación de la hipótesis en el contexto específico de cuencas de llanura representa una contribución significativa, dado que la mayoría de las metodologías de evaluación de vulnerabilidad hidrológica han sido desarrolladas y validadas en ambientes con mayor relieve, donde factores como la pendiente y la elevación ejercen un control dominante sobre la distribución del agua superficial (Kazakis *et al.*, 2015; Vojtek & Vojteková, 2019). En la cuenca A1, con pendiente media de 0,90% y desnivel de apenas 80 metros en 250 km de longitud axial, la posición del terreno y el coeficiente de escurrimiento ejercen la mayor influencia sobre la vulnerabilidad, reflejando las características distintivas de los sistemas hidrológicos de llanura donde predominan los procesos de anegamiento ante eventos extremos de excesos hídricos.

10.1 Contribuciones originales de la investigación

Esta tesis doctoral ha demostrado que es posible identificar, evaluar y zonificar la vulnerabilidad hidrológica en cuencas de llanura pampeana mediante la integración de análisis morfométrico, modelación hidrológica geoespacial, teledetección satelital y evaluación multicriterio. Los objetivos planteados fueron cumplidos en su totalidad y la hipótesis fue confirmada mediante validación empírica con datos independientes.

Las contribuciones metodológicas, particularmente el desarrollo del complemento GeoQ y la adaptación del AHP para ambientes de llanura, trascienden el caso de estudio específico y son aplicables a otras cuencas con características similares. La integración del marco metodológico del ODS 6.6.1 vincula esta investigación con los esfuerzos globales de monitoreo y gestión sostenible de recursos hídricos.

Los productos cartográficos generados constituyen herramientas técnicas de utilidad inmediata para la planificación territorial y la gestión del riesgo hidrológico en la región noroeste de la provincia de Buenos Aires. En un contexto de intensificación del ciclo hidrológico asociado al cambio climático, la disponibilidad de información científica sobre vulnerabilidad hidrológica adquiere relevancia creciente para la toma de decisiones orientadas a la adaptación territorial y la reducción del riesgo de desastres.

Esta tesis doctoral presenta contribuciones originales en tres dimensiones complementarias: metodológica, científica y territorial.

Desde la perspectiva metodológica, la contribución más destacada es el desarrollo del complemento GeoQ para QGIS, que constituye la primera herramienta de código abierto disponible en el repositorio oficial del software que implementa la metodología del Número de Curva para análisis hidrológico espacial. GeoQ automatiza el procesamiento de datos de uso del suelo y textura edáfica para calcular parámetros hidrológicos fundamentales (escorrentía, infiltración, abstracciones), generando cartografía temática directamente aplicable a la planificación territorial. El carácter de software libre garantiza su accesibilidad para investigadores, técnicos y gestores de todo el mundo, promoviendo su aplicación en contextos diversos y facilitando su mejora continua mediante la colaboración de la comunidad de usuarios. Las 2.736 descargas registradas y las citaciones en trabajos de otros investigadores evidencian la adopción efectiva de la herramienta.

Una segunda contribución metodológica relevante es la adaptación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la evaluación de vulnerabilidad hidrológica en ambientes de llanura pampeana. A diferencia de aplicaciones previas que privilegian factores asociados al relieve (pendiente, elevación, rugosidad), la metodología desarrollada prioriza indicadores específicos de ambientes de baja energía de relieve: posición del terreno, coeficiente de escurrimiento, características de drenaje edáfico y dinámica del agua superficial derivada de teledetección. Esta adaptación permite una representación más realista de los procesos hidrológicos dominantes en cuencas de llanura, donde la susceptibilidad a inundación no está controlada primariamente por la topografía abrupta sino por la capacidad de infiltración, el drenaje del suelo y la posición relativa en el paisaje.

La integración del indicador ODS 6.6.1 en el marco de la evaluación de vulnerabilidad hidrológica representa una tercera contribución metodológica. Los productos del Global Surface Water Explorer, desarrollados en el contexto del monitoreo global de ecosistemas relacionados con el agua, fueron incorporados tanto como factor de evaluación (ocurrencia de agua) como para la validación del modelo (extensión máxima de agua). Esta integración vincula la investigación con los marcos metodológicos internacionales de desarrollo sostenible, facilitando la comparabilidad de resultados entre diferentes cuencas y escalas territoriales.

Desde la perspectiva científica, esta tesis contribuye al conocimiento sobre la dinámica hidrológica de las cuencas de llanura pampeana, un ambiente con características únicas a nivel mundial debido a sus pendientes extremadamente bajas y la particular interacción entre aguas superficiales y subterráneas. La caracterización morfométrica, hidrológica y de vulnerabilidad de la cuenca A1 proporciona información de referencia para estudios comparativos en la región y constituye una base para el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático en ambientes donde se proyecta una intensificación del ciclo hidrológico.

Desde la perspectiva territorial, los productos cartográficos generados (caracterización morfométrica, dinámica del agua superficial, zonificación de los indicadores del ODS 6.6.1, mapas de zonificación de vulnerabilidad) constituyen herramientas técnicas directamente aplicables para la planificación del uso del suelo, la gestión del riesgo hidrológico y la toma de decisiones a nivel municipal y regional. La identificación de 259,15 km² con muy alta vulnerabilidad, junto con los 3.066,61 km² de alta vulnerabilidad que requieren medidas de adaptación específicas, proporciona información concreta para orientar políticas públicas de ordenamiento territorial en los 15 partidos que integran la cuenca A1.

10.2 Aportes para la planificación territorial

Los resultados de esta investigación tienen aplicación directa en múltiples aspectos de la planificación territorial y la gestión del riesgo hidrológico en la región pampeana.

A escala regional, la zonificación de vulnerabilidad permite diferenciar áreas aptas para distintos usos del suelo, delimitar zonas prioritarias para conservación de humedales y cuerpos de agua, y diseñar estrategias de adaptación al cambio climático basadas en evidencia. La información sobre la variabilidad temporal del agua superficial (incrementos de hasta 552% entre años extremos) proporciona parámetros para el dimensionamiento de obras hidráulicas y la planificación de contingencias ante eventos extremos.

A escala local, la cartografía de extensión máxima y recurrencia de agua resulta fundamental para decisiones de localización de infraestructura vial crítica (rutas, viviendas, instalaciones productivas), permitiendo evitar áreas de riesgo documentado o diseñar medidas de protección apropiadas. El caso de aplicación desarrollado en el Anexo B para la evaluación de vulnerabilidad vial en el partido de Junín ejemplifica esta utilidad práctica, identificando tramos de caminos rurales que requieren priorización para obras de mejoramiento.

Para las actividades productivas que caracterizan la economía regional, la información sobre estacionalidad y recurrencia del agua permite optimizar el calendario de actividades agropecuarias, identificar períodos de riesgo y diseñar sistemas productivos resilientes a la variabilidad hidrológica. Considerando que las pérdidas económicas por inundaciones en la región pampeana superan los mil millones de dólares anuales según estimaciones del Banco Mundial (2021), la disponibilidad de herramientas de planificación basadas en evidencia científica adquiere relevancia económica significativa.

10.3 Propuestas de futuras línea de investigación

Como líneas futuras de investigación se identifican la incorporación de escenarios de cambio climático para proyectar la evolución de la vulnerabilidad hidrológica, la integración de variables socioeconómicas para transitar hacia evaluaciones de riesgo, la validación de la metodología en otras cuencas de la llanura pampeana, y el desarrollo de actualizaciones del complemento GeoQ que incorporen funcionalidades adicionales para la modelación hidrológica distribuida. La disponibilidad de productos satelitales actualizados periódicamente a través de la plataforma sdg661.app ofrece la posibilidad de monitoreo continuo de la dinámica del agua superficial más allá del alcance temporal de esta tesis.

10.4 Bibliografía

Banco Mundial. (2021, 29 de junio). *Impactos de las crisis climáticas en la pobreza y la macroeconomía en la Argentina* [Comunicado de prensa].

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/29/banco-mundial-argentina-pierde-unos-1000-millones-dolares-anuales-por-inundaciones>

Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros

region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021). GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGIS®. *Revista Estudios Ambientales*, 9(2), 170-192.

<https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1289>

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.

Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water*, 11(2), Artículo 364. <https://doi.org/10.3390/w11020364>

11 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a mi directora, la Dra. Fernanda Julia Gaspari, cuya guía magistral y amplia experiencia fueron un norte fundamental de este trabajo. Le agradezco no solo por la paciencia, el tiempo y el entusiasmo constante que me brindó en cada etapa, sino también por ser un ejemplo constante de integridad y rigor académico. Gracias a su dirección, confianza y acompañamiento, esta investigación ha logrado superar los obstáculos y llegar a buen puerto, marcando de manera definitiva mi formación profesional y personal.

Esta tesis fue posible gracias al apoyo de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires y de la República Argentina, mediante una Beca doctoral Científico-Tecnológica, otorgada para el periodo 2018-2024.

Las actividades se iniciaron bajo el proyecto “Sistema Soporte de las Decisiones frente a eventos extremos para la gestión de la Cuenca Alta del Río Salado de la Provincia de Buenos Aires. Estudio De Impacto Ambiental y Social (EIAyS)”. Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Medio Ambiente y Cambio Climático (FONARSEC). MINCyT. Convocatoria 2013. Res. N° 348/13 de la ANPCyT. Res N° 572/14. Director: Dr. Pablo Bereciartua. Representante por la UNLP: Dra. Fernanda Gaspari. Periodo 2015 - 2020.

La financiación de este trabajo fue en colaboración con los Proyectos del Programa de Incentivos a los Docentes e investigadores de la Secretaría de Política Universitaria, del Ministerio de Educación de la Nación, denominados “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, al Proyecto I+D 2016 N° 11/A286. Período 2016-2019, y “Lineamientos generales para la planificación en cuencas hidrográficas preservando los servicios hidrológicos ambientales”. Proyecto I + D 2019 N° 11/A347 Período 2020-2024, ambos dirigidos por la Dra. Fernanda Gaspari.

Los análisis de las precipitaciones fueron realizados con datos proporcionados por el Centro de Información Meteorológica (CIM) del Servicio Meteorológico Nacional (Expediente N° 154.213/2016), por la solicitud N°180.923.

El entorno de trabajo se realizó en el Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), al cual agradezco por el apoyo brindado a lo largo de estos años, particularmente, los integrantes de la Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas con los cuales pude colaborar y participar en diferentes ámbitos científicos y académicos, contribuyendo a nutrir los contenidos abordados en la tesis doctoral.

Es importante mencionar el apoyo del grupo de trabajo del licenciado Raul Perdomo de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP, quien junto con la Dra. María Eugenia Gómez y el Dr. Lautaro Simontachi nos permitieron avanzar en los primeros capítulos de esta tesis.

Se agradece al Grupo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo. Grupo de Investigación Cuaternario y Geomorfología, PAI RNM-273. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, España por su colaboración con el modelo HidroBio.

12 ANEXOS

A. Anexo Capítulo 7. Tabla de ocupación de superficies de GSWE anual *versus* Precipitación total anual del SMN.

A continuación, se presenta la Tabla A. 1 una base de datos tabular que expresa el área con presencia de agua superficial (km²) y precipitación total anual (mm) en la cuenca A1 del río Salado (1984-2020). Entre los años 2012-2019 (resaltados azules) se representa el periodo de mayor exceso pluvial del registro, donde también se visualiza la mayor presencia de agua permanente. En contraparte, entre los años 1994-1996 (resaltados naranjas) se presentó la mayor superficie sin agua debido a la escasa precipitación del periodo.

Tabla A. 1. Total superficie de extensión máxima de agua GSWE y acumulado de precipitación anual de estaciones del SMN, por los años 1984 – 2020.

Año	Área presencia agua (km ²)			PP total (mm)		
	Sin Agua	Agua Estacional	Agua Permanente	Junín	Laboulaye	Venado Tuerto
1984	592,95	2,46	15,92	1105,1	1070,5	
1985	157,78	10,27	122,27	1022,5	900,2	
1986	1.679,36	171,5	212,83	889,6	835	
1987	1.454,71	375,26	261,66	1169,9	858,2	
1988	1.433,89	468,53	190,61	721,3	729,7	
1989	1.716,88	237,85	139,21	1.012,5	702,8	391,1
1990	1.368,96	435,78	284,98	1.412,4	984,6	1175,6
1991	1.032,99	709,32	345,26	1.252,6	940,5	886,9
1992	1.196,41	494,79	341,92	865,9	896,2	722
1993	836,49	1.009,86	241,67	1.482,5	1151	154,1
1994	1.153,34	553,17	335,34	758,8	881,7	726,5
1995	1.179,31	570,04	340,15	875,7	808,1	634
1996	1.469,35	471,14	153,83	995,8	901,7	726,4
1997	1.585,8	349,38	157,93	998,3	1.151,2	1.082,7
1998	1.046,04	652,78	389,35	906,9	1.365,7	1.007,1
1999	800,72	891,12	402,16	783,8	1.168,2	773,9
2000	635,81	1.143,17	315,01	1.214,8	910,3	1.078,2

Área presencia agua (km ²)				PP total (mm)		
Año	Sin Agua	Agua Estacional	Agua Permanente	Junín	Laboulaye	Venado Tuerto
2001	450,99	1.175,38	468,6	1.786,7	1.036,2	1.025,5
2002	504,46	1109	478,85	1.320,9	689,1	1.116,6
2003	545,65	1.208,03	337,71	1.021,6	572,3	736,4
2004	950,83	897,23	247	961,2	1103,6	814,3
2005	1.369,55	493,81	231,66	820,1	706,9	580,4
2006	1.505,53	424,96	164,9	1.116,3	915,7	1.005,7
2007	973,06	859,31	262,31	1.112,8	963,7	884,4
2008	1.564,3	404,15	126,59	745,7	718,3	780,5
2009	1.789,47	277,87	27,99	1.185,7	887,6	891,4
2010	1.067,01	768,14	259,93	946,4	770,8	769,6
2011	1.683,17	314,34	96,94	917,4	597,7	539,8
2012	1.238,01	578,56	276,73	1.561,2	1.260,8	995,6
2013	1.203,8	652,84	238,78	1.006,2	549,8	501,5
2014	924,35	849,26	321,8	1.541,9	1.188,3	1.064,6
2015	1.309,03	1.173,58	395,32	1.329,9	958,8	1.093,3
2016	1.018,04	1.256,78	585	1.107,9	1.375,4	1.069,3
2017	403,43	1.811,31	656,84	1.208,6	1.090,6	1.176,6
2018	1.689,44	838,79	341,74	1.233,8	760,5	828,9
2019	1.808,45	656,36	388,37	1.099,7	670	860,8
2020	1.588,97	913,55	367,65	195,2	416,1	325,4

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Global Surface Water Explorer (Pekel *et al.*, 2016) y Servicio Meteorológico Nacional.

Nota: En el año 1993 hay una deficiencia de datos para la estación de Venado Tuerto, ya que solo se presentan datos del mes de octubre de ese año.

B. Anexo Capítulo 7. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO

Contribución al avance en la prevención del riesgo hidrológico en el partido de Junín¹⁹

B.1. Introducción

La gestión integral del riesgo hidrológico en ambientes de llanura pampeana requiere información precisa sobre la altimetría del terreno y la dinámica espaciotemporal del agua superficial. En regiones caracterizadas por pendientes extremadamente bajas, la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante eventos extremos de precipitación constituye un factor limitante para el desarrollo territorial y la conectividad regional (Abdulla *et al.*, 2020; World Bank, 2021), como la cuenca A1 del río Salado. La red vial rural, conformada por caminos principales, secundarios y terciarios, representa el sistema circulatorio que permite el flujo de productos agropecuarios hacia centros de comercialización, así como el acceso a servicios básicos para la población dispersa (World Bank, 2024).

La red vial rural del partido de Junín, la cual se encuentra contenida en la cuenca A1, específicamente en la zona de su desembocadura, caracterizada por pendientes bajas (0,90-1,18%) y densidad de drenaje reducida, la expone a interrupciones recurrentes durante eventos de excesos hídricos (Kruse & Ainchil, 2017). La identificación de sectores viales con mayor susceptibilidad a anegamiento resulta esencial para la priorización de inversiones municipales en mejoramiento de infraestructura, incluyendo elevación de rasantes, construcción de alcantarillado transversal y obras de drenaje (World Bank, 2021).

El objetivo específico fue identificar tramos de la red vial rural que presentan intersección o proximidad con áreas de presencia recurrente de agua superficial, cuantificando la extensión, frecuencia y duración temporal del anegamiento. Esta información aporta un insumo directo para que las autoridades municipales puedan priorizar obras de mejoramiento vial (elevación de caminos, instalación de alcantarillas, sistemas de drenaje) en sectores críticos identificados mediante evidencia satelital de 36 años.

Los resultados de este análisis fueron presentados en el II Congreso Multidisciplinario de la UNNOBA "Ciencia y Tecnología para el desarrollo sostenible" (Gaspari *et al.*, 2022), constituyendo un aporte metodológico para la planificación territorial en zonas de llanura susceptibles a inundación. La metodología desarrollada puede replicarse en otras áreas de la cuenca A1 y en regiones con características hidrogeomorfológicas similares, contribuyendo al fortalecimiento de la resiliencia territorial ante el cambio climático y la variabilidad hidrológica.

B.2. Materiales y métodos

El presente caso de estudio complementario, desarrollado en el marco del análisis del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.6.1 (ODS 6.6.1) presentado en el Capítulo 7 de la presente tesis doctoral,

¹⁹ Publicado en: Gaspari, Fernanda; Montealegre Medina, Fabio Alejandro; Simontacchi, Lautaro; Perdomo, Santiago; Gómez, María Eugenia; Fariña, Leandro; Perdomo, Raúl. (2022). Avance en la Prevención del Riesgo Hidrológico en el Partido de Junín. II Congreso Multidisciplinario de la UNNOBA: "Ciencia y Tecnología para el desarrollo sostenible", Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA). 22 y 23 de septiembre del 2022. Pergamino. Buenos Aires. <https://congresomultidisciplinario.unnoba.edu.ar/>

integra información altimétrica precisa sobre aproximadamente 500 km de caminos rurales, capturadas en campo con técnicas GPS cinemáticas, del partido de Junín, comparando dicha información con los productos satelitales del Global Surface Water Explorer (GSWE).

El área de estudio comprende el partido de Junín, ubicados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El partido se inserta en la llanura pampeana, específicamente en el sector deprimido y desembocadura de la cuenca A1 del río Salado, caracterizado por pendientes regionales del orden de 1 m/km (0,1%), ausencia de red de drenaje bien definida, y predominancia de procesos de anegamiento por saturación sobre escorrentía concentrada (MOSP, 1999; Kruse & Ainchil, 2017).

La red vial del área de estudio incluye rutas nacionales (RN 7, RN 188), rutas provinciales (RP 65, RP 46, entre otras), y una extensa red de caminos rurales terciarios no pavimentados que conectan establecimientos agropecuarios con la ciudad de Junín y localidades menores. Estos caminos rurales, construidos generalmente a nivel del terreno natural o con elevaciones mínimas, constituyen el principal sistema de acceso para la producción agropecuaria regional. Durante eventos de precipitación extraordinaria, numerosos tramos de esta red vial quedan bajo agua o inaccesibles, generando problemas de conectividad y aislamiento rural.

B.2.1. Levantamiento GPS cinemático sobre caminos rurales

La información altimétrica de la red vial se obtuvo mediante levantamientos GPS sobre caminos rurales, ejecutados en colaboración con el Equipo de Geodesia del Profesor Raúl Perdomo (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP). Este levantamiento se realizó posteriormente al trabajo de Gómez *et al.* (2018), utilizando la misma infraestructura geodésica de referencia desarrollada en aquel estudio, donde se estableció un modelo digital de elevaciones integrado para el partido de Junín mediante la combinación de ménsulas históricas calibradas, puntos GPS cinemáticos y el modelo satelital SRTM ajustado.

Los recorridos GPS sobre caminos se realizaron mediante técnica cinemática, instalando un receptor GNSS sobre vehículo que registró coordenadas tridimensionales (latitud, longitud, altura) en modo continuo. El procesamiento de las observaciones permitió obtener cotas sobre el nivel medio del mar con precisión decimétrica (orden de 15-20 cm), adecuada para caracterizar diferencias altimétricas en el contexto de llanura donde variaciones de pocos decímetros determinan susceptibilidad a inundación (Figura B. 1). En dicha figura se visualiza al equipo de geodesia realizando mediciones GNSS en el partido de Junín, mostrando además el equipo receptor GNSS instalado en zona rural. Como ejemplo se presenta una ménsula histórica del IGM utilizada como referencia altimétrica en el modelo base desarrollado por Gómez *et al.* (2018).



Figura B. 1. Trabajo de campo para levantamiento GPS. Fuente: Equipo de Geodesia de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

El sistema de observación consistió en dos receptores GNSS dual-frecuencia operando simultáneamente, donde en la estación base (referencia) se instaló un receptor GNSS en un punto auxiliar del campo experimental de la UNNOBA, funcionando en modo estático durante tres días consecutivos mientras se realizaban los recorridos cinemáticos sobre caminos. Las coordenadas precisas de esta estación se obtuvieron mediante procesamiento diferencial con la estación permanente de Pergamino (PEBA), perteneciente a la red de estaciones permanentes GNSS de Argentina (RAMSAC). Este post-procesamiento permitió establecer las coordenadas de la estación base con precisión centimétrica en el sistema de referencia geodésico POSGAR 07.

El receptor móvil (rover), conforme el segundo receptor GNSS que se instaló sobre el techo de una camioneta que recorrió aproximadamente 500 km de caminos rurales en el partido de Junín y zonas aledañas. El receptor operó en modo cinemático continuo, registrando observaciones de código y fase portadora en las frecuencias L1 y L2 del sistema GPS y frecuencias equivalentes de GLONASS, con una tasa de muestreo de 1 Hz (una observación por segundo).

Una vez procesado los datos, se generó una capa de puntos, con la información de coordenadas planimétricas y altimétricas, la cual fue un insumo para realizar la comparación con las imágenes del GSWE sobre la red vial donde se capturaron los puntos GPS.

B.2.2. Productos satelitales del Global Surface Water Explorer

Para el análisis de la dinámica temporal del agua superficial y la identificación de áreas susceptibles a inundación se utilizaron 4 productos temáticos del GSWE (Pekel *et al.*, 2016; UNEP, 2021), cuyos productos se describen con más detalle en el Capítulo 7. A continuación, se hace una breve descripción de estos productos para tener en cuenta en el presente análisis:

- Extensión máxima de agua: Identifica todos los píxeles (30 m de resolución) donde se detectó agua superficial al menos una vez durante 1984-2020, delimitando la envolvente máxima de áreas históricamente inundadas.

- Recurrencia del agua: Cuantifica mediante escala porcentual (0-100%) la frecuencia con la que cada píxel presentó agua. Valores bajos (< 25%) indican anegamiento esporádico, valores intermedios (25-75%) anegamiento frecuente, y valores altos (> 75%) agua permanente.
- Estacionalidad: Clasifica píxeles según el número de meses del año que típicamente presentan agua (escala 0-12 meses), diferenciando cuerpos permanentes (10-12 meses) de estacionales (1-9 meses).
- Transición del agua: Identifica cambios en el régimen hídrico entre el período inicial (1984-1990) y final (2014-2020) de observaciones, detectando áreas donde la dinámica del agua ha cambiado significativamente.

Todos los productos del GSWE presentan resolución espacial de 30 m (tamaño de píxel heredado de las imágenes Landsat) y están disponibles en formato GeoTIFF georreferenciado en el sistema de coordenadas WGS84. Estos productos forman parte de la metodología oficial de monitoreo del indicador ODS 6.6.1 establecido por Naciones Unidas (UNEP, 2021). La validación global del producto mostró una precisión superior al 95% en la detección de agua (Pekel *et al.*, 2016).

B.2.3. Integración de información GPS y productos GSWE

La integración de la información altimétrica GPS de los caminos rurales con los productos temáticos del GSWE se realizó mediante superposición y análisis espacial con la herramienta SIG QGIS 3, siguiendo los siguientes pasos metodológicos:

- Preparación de capas vectoriales: Las trayectorias GPS cinemáticas sobre caminos se organizaron como capas vectoriales de tipo punto, conservando los atributos de coordenadas geográficas (latitud, longitud) y altura elipsoidal reducida al nivel medio del mar. Adicionalmente, se incorporaron capas vectoriales de la red vial oficial (IGN, s.f.), clasificadas por jerarquía: rutas nacionales, rutas provinciales, caminos rurales terciarios.
- Productos ráster GSWE: Los productos temáticos (extensión máxima, recurrencia, estacionalidad y transición) se descargaron desde la plataforma web para el área de interés (partido de Junín) y se importaron como capas ráster en el proyecto QGIS. Todos los productos fueron reproyectados al sistema de coordenadas POSGAR 07 / Argentina zona 5 (EPSG:5345) para compatibilidad con la información local.
- Superposición espacial: Mediante herramientas de análisis espacial de QGIS, se realizó la superposición entre las capas vectoriales de la red vial (con información altimétrica GPS) y las capas ráster de los productos GSWE. Esta operación permitió extraer, para cada segmento de camino, los valores de recurrencia, estacionalidad y tipo de transición del agua en una franja de influencia de ± 50 m a ambos lados del eje vial.
- Zonificación de vulnerabilidad vial: Con base en la información integrada, se clasificaron los segmentos viales según su grado de vulnerabilidad ante inundación:
 - Vulnerabilidad BAJA: Caminos no interceptados por la extensión máxima de agua GSWE, sin registro histórico de inundación en 36 años.
 - Vulnerabilidad MEDIA: Caminos que intersectan áreas con baja recurrencia de agua (< 25%) y estacionalidad reducida (< 3 meses/año).
 - Vulnerabilidad ALTA: Caminos que atraviesan áreas con recurrencia moderada a alta de agua (> 25%) y/o estacionalidad de 3-6 meses/año.

- Vulnerabilidad MUY ALTA: Caminos adyacentes o que atraviesan cuerpos de agua permanente (recurrencia > 75%, estacionalidad > 10 meses/año).

Para ilustrar los resultados del análisis, se seleccionaron dos casos contrastantes que ejemplifican diferentes grados de vulnerabilidad vial:

- Caso 1 (representado con marco rojo): Tramo de camino rural que NO fue afectado por agua durante el período 1984-2020, evidenciando baja susceptibilidad a inundación.
- Caso 2 (representado con marco verde/cian): Tramo de camino rural que presenta interrupción por agua durante eventos de excesos hídricos, con registro de afectación en múltiples ocasiones según productos GSWE.

Posteriormente, la integración SIG permitió generar cartografía de síntesis que combina información altimétrica precisa de la red vial con datos satelitales de largo plazo sobre la dinámica del agua superficial, proporcionando una herramienta de diagnóstico para la gestión de la transitabilidad vial en contextos de llanura susceptible a inundación.

B.3. Resultados y discusión

La densidad de puntos GPS (aproximadamente 1 punto cada 10-15 m aproximadamente) permitió caracterizar la altimetría de la red vial con detalle suficiente para el análisis de vulnerabilidad ante inundación. Los 500 km de trayectorias GPS sobre la red vial del partido de Junín, abarcaron caminos de diferente jerarquía: rutas provinciales pavimentadas, caminos municipales con afirmado, y caminos rurales de tierra (Figura B. 2, panel derecho).

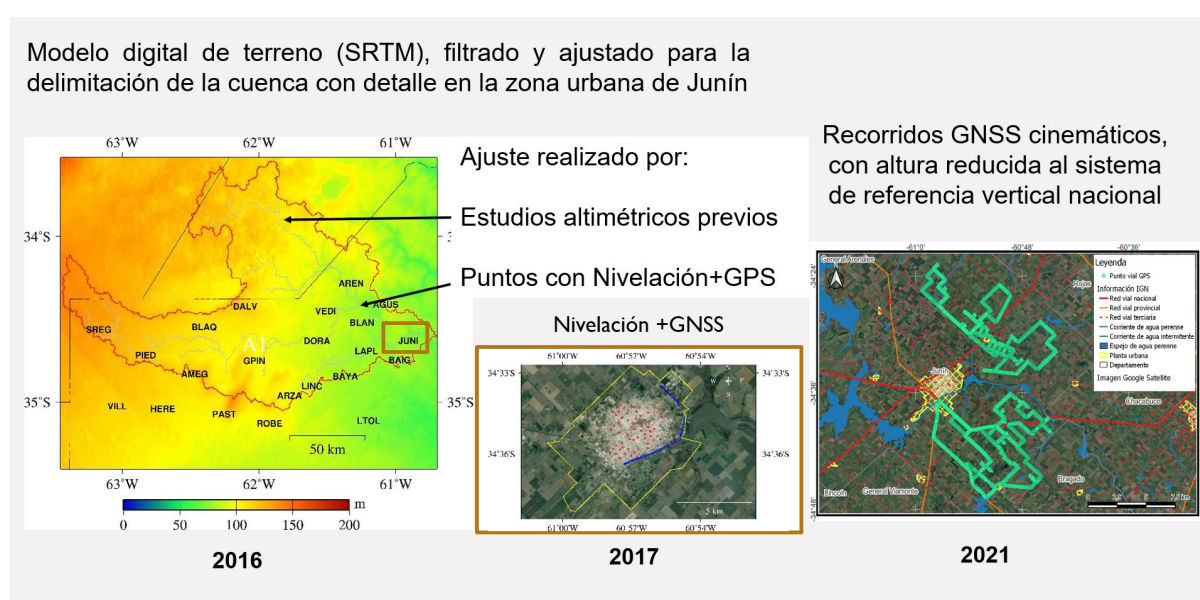


Figura B. 2. Evolución temporal del modelo de elevaciones en el área de estudio. Fuente: Adaptado de Gómez *et al.* (2018).

Nota: Izquierda: Modelo SRTM filtrado y ajustado (año 2016) utilizado como base altimétrica. Centro: Metodología de ajuste mediante estudios altimétricos previos (año 2017) con nivelación geométrica y GNSS sobre zona urbana de Junín (Gómez et al., 2018). Derecha: Recorridos GPS cinemáticos sobre red vial rural (año 2021) georreferenciados sobre imagen satelital, base del presente análisis de vulnerabilidad.

La anterior progresión metodológica refleja el refinamiento continuo de la información altimétrica disponible, con especial énfasis en la caracterización precisa de la red de caminos rurales, útil para el análisis de accesibilidad durante eventos de inundación. El rango altimétrico de los caminos relevados varió entre 71 y 88 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.), con predominio de cotas en el rango 75-82 m s.n.m (Gómez *et al.*, 2017). Esta información, integrada con los productos GSWE, permitió establecer la base cuantitativa para identificar sectores viales en riesgo de anegamiento. Esta variabilidad hidrológica interanual justifica la necesidad de evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura vial mediante análisis temporales de largo plazo, como el utilizado en el presente estudio a través de los productos GSWE. Como lo expresa Bohn *et al.* (2011) la región pampeana se caracteriza por una marcada alternancia entre períodos de exceso hídrico y déficit, fenómeno que ha sido documentado extensamente para el sudoeste bonaerense.

Para ejemplificar el estado de los datos integrados, se seleccionaron dos casos de estudio contrastantes dentro del partido de Junín. La selección se basó en criterios de representatividad de las condiciones encontradas en el análisis regional, como se muestran en la Figura B. 3:

- Caso 1 (marco rojo): Representa un sector de caminos rurales que no fueron afectados por presencia de agua durante el período analizado (1984-2020). Los caminos en este caso se localizan en terrenos con cotas relativamente más elevadas dentro del contexto local (aproximadamente 80-82 m s.n.m.). La ausencia de intersección con la extensión máxima de agua GSWE, sumada a las características altimétricas, indica baja susceptibilidad a inundación incluso durante eventos hidrológicos extremos.
- Caso 2 (marco verde/cian): Representa un sector de caminos rurales que presenta riesgo de afectación por agua. Los caminos en este caso atraviesan o están adyacentes a áreas deprimidas del terreno (cotas aproximadas 75-77 m s.n.m.) que funcionan como zonas de acumulación de agua durante eventos de excesos hídricos. Durante determinadas ocasiones, registradas por los productos GSWE, los caminos en este sector quedaron interrumpidos por agua, generando problemas de accesibilidad hacia establecimientos rurales.

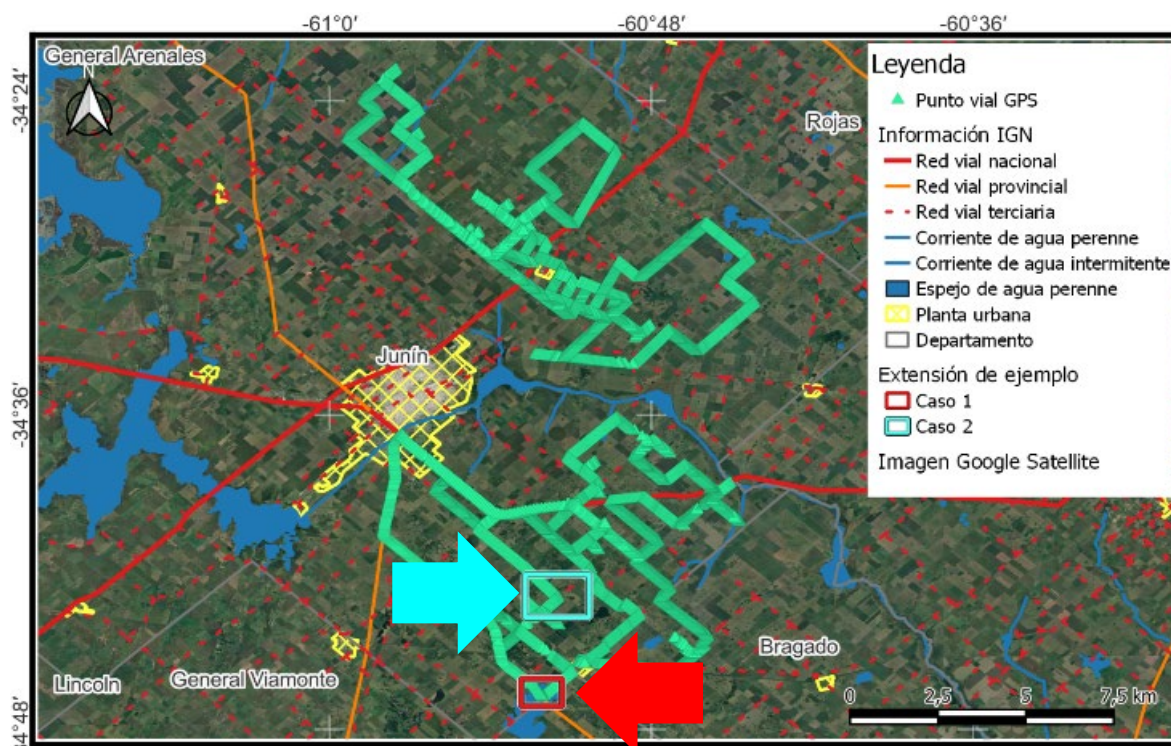


Figura B. 3. Mapa de ubicación del área de estudio y puntos GPS sobre la red vial.

La Figura B. 3 muestra la ciudad de Junín como centro urbano principal, la red vial jerarquizada (nacional en rojo, provincial en naranja, terciaria en líneas punteadas), los puntos de levantamiento GPS (triángulos verdes), las corrientes de agua perenne e intermitente (líneas azul oscuro y claro), espejos de agua perenne (polígonos azules), el límite departamental (línea naranja gruesa), y la localización de los dos casos de estudio seleccionados (Caso 1 en recuadro rojo, Caso 2 en recuadro verde). La distribución espacial de los puntos GPS evidencia la cobertura del relevamiento cinemático sobre la red vial principal y secundaria del partido.

La identificación de tramos viales con permanencia de agua en el período analizado reviste especial relevancia para la gestión de la infraestructura vial rural. Fan *et al.* (2020) demostraron mediante teoría de percolación que la inundación de un segmento vial incrementa significativamente la probabilidad de afectación de segmentos adyacentes, comportamiento que se observa en los tramos identificados como en el Caso 2 presentado. Este patrón de propagación fundamenta la priorización de intervenciones en los tramos críticos identificados, donde la elevación del camino o la construcción de obras de drenaje podría reducir el riesgo de interrupción de la conectividad vial durante eventos de exceso hídrico.

El siguiente paso fue superponer los productos de GSWE, para así evaluar e identificar que elementos de la red vial que son susceptibles a inundación. En la Figura B. 4 corresponde a la extensión máxima de agua, que delimita áreas que, aunque puedan encontrarse secas la mayor parte del tiempo, han experimentado inundación en eventos extremos del pasado reciente.

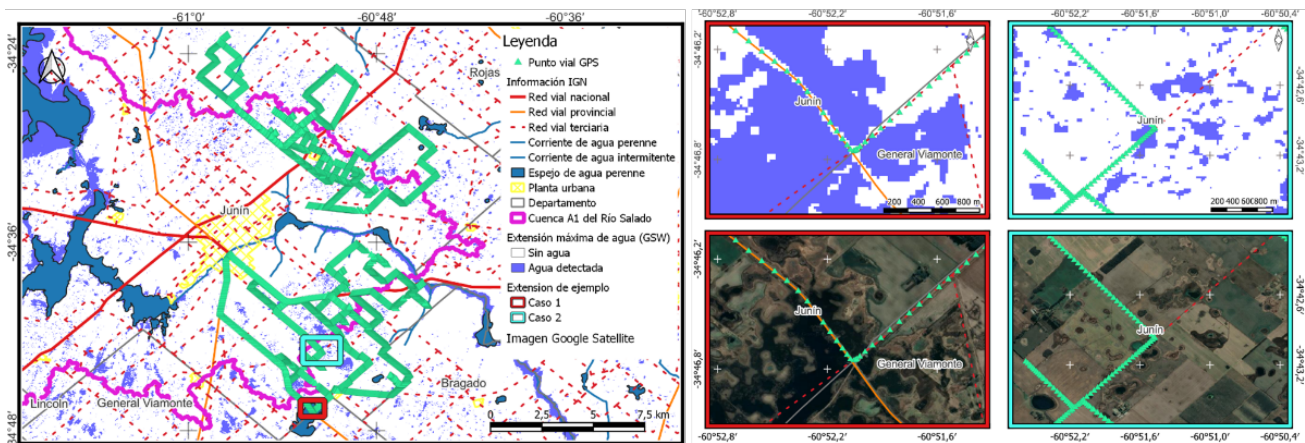


Figura B. 4. Extensión máxima de agua (1984-2020) superpuesta con puntos GPS y red vial.

Nota: Panel izquierdo: Vista regional mostrando la envolvente máxima de agua (píxeles azules) en relación con la red vial GPS (triángulos verdes), espejos de agua perenne (polígonos azul oscuro), red vial clasificada, y localización de casos de estudio. Panel derecho (Caso 1): Detalle del sector sin afectación por agua, mostrando tanto el producto GSWE (superior) como imagen satelital de contexto (inferior). Panel derecho (Caso 2): Detalle del sector con afectación de caminos por agua, mostrando producto GSWE (superior) e imagen satelital (inferior). La imagen satelital corresponde a la imagen actual de Google consultada en julio de 2022.

Evaluando el Caso 1, Los caminos rurales en este sector no presentan intersección con la extensión máxima de agua, ya que son caminos con adecuada elevación respecto a su contorno, donde se observa que están rodeado de cuerpos de agua o una zona con presencia de agua. Esta configuración indica que los caminos del Caso 1 presentan baja vulnerabilidad y han mantenido transitabilidad incluso durante los eventos hidrológicos extremos del período 1984-2020. Respecto al Caso 2, en contraste, los caminos rurales en este sector muestran intersección o adyacencia inmediata con la extensión máxima de agua. La cartografía indica que, en eventos extremos, el agua superficial alcanzó y en algunos casos superó la cota de los caminos, generando interrupciones de la transitabilidad. En la imagen satelital de base identifican sectores con evidencias de humedad del suelo o encharcamiento estacional.

La comparación entre ambos casos evidencia que la vulnerabilidad de la infraestructura vial en llanura pampeana está controlada fundamentalmente por dos factores, la posición altimétrica relativa dentro del contexto local (diferencias de apenas 3-5 m marcan la distinción entre áreas seguras y vulnerables), y la proximidad a zonas de acumulación o tránsito preferencial de agua superficial identificadas mediante los productos GSWE.

El producto de recurrencia del agua cuantifica, mediante escala porcentual (0-100%), la frecuencia con la que cada píxel presentó agua superficial durante el período de análisis (Figura B. 5). Este producto permite diferenciar áreas con inundación esporádica (recurrencia baja, < 25%) de áreas con anegamiento frecuente (recurrencia moderada, 25-75%) o permanente (recurrencia alta, > 75%).

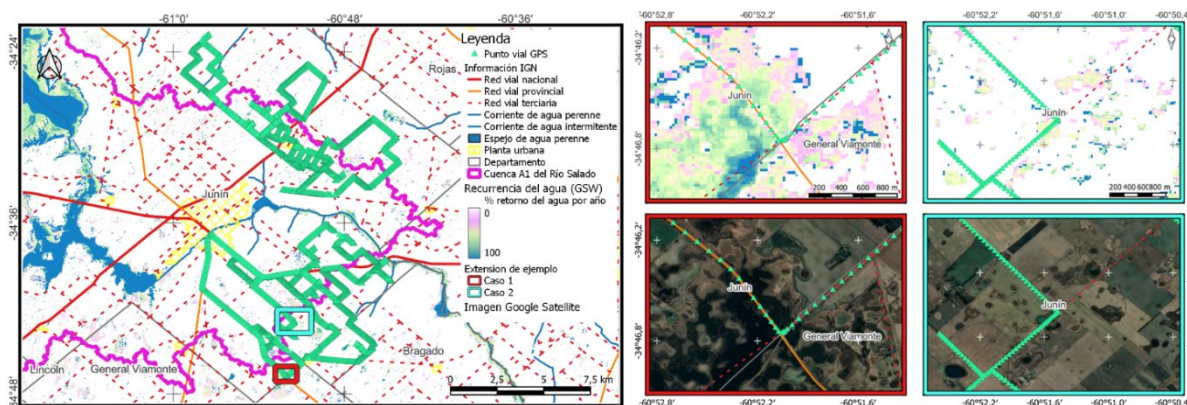


Figura B. 5. Recurrencia del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.

Nota: Panel izquierdo: Vista regional mostrando la recurrencia de agua mediante escala cromática (tonos rosados/claros = baja recurrencia < 25%, tonos celestes = recurrencia moderada 25-50%, tonos azules intensos = alta recurrencia > 75%), superpuesta con la red vial GPS y demás capas de información. Paneles derechos: Detalles para Caso 1 y Caso 2 con mapa de recurrencia e imagen satelital.

Para el anterior análisis de recurrencia, el Caso 1 confirma la ausencia de píxeles con valores de recurrencia significativos en la zona de los caminos, esto indica que los caminos observados en este caso no han experimentado afectación por agua durante el período de estudio, ratificando la evaluación de baja vulnerabilidad derivada del producto de extensión máxima. Para el Caso 2, se muestra presencia de píxeles con recurrencia del agua en rango variable (10-50%) en proximidad inmediata o intersección con los caminos rurales. Los tonos rosados y celestes claros, que representan recurrencias del orden del 10-25%, indican que estas áreas han experimentado presencia de agua en aproximadamente 4-10 ocasiones durante los 36 años de observaciones (considerando una frecuencia promedio de 1 imagen válida por mes, correspondiente a unas 400-450 observaciones totales). Esto equivale a una frecuencia de anegamiento de 1 evento cada 3-9 años aproximadamente, consistente con la recurrencia de eventos pluviométricos extremos en la región pampeana.

La distribución espacial de la recurrencia muestra patrones vinculados a la microtopografía: las áreas deprimidas (cotas mínimas dentro del contexto local) presentan mayor recurrencia que las áreas relativamente elevadas. Los caminos que atraviesan zonas con recurrencia moderada (20-40%) enfrentan interrupciones recurrentes de la transitabilidad, generando problemas crónicos de accesibilidad rural durante y después de eventos lluviosos importantes.

El producto de estacionalidad clasifica los píxeles según el número de meses del año que típicamente presentan agua superficial, en una escala de 0 (sin agua) a 12 meses (agua permanente todo el año) (Figura B. 6). Este producto permite diferenciar cuerpos de agua permanentes, que mantienen agua durante todo el ciclo anual, de cuerpos estacionales que se llenan durante la estación húmeda y se secan parcial o totalmente durante la estación seca.

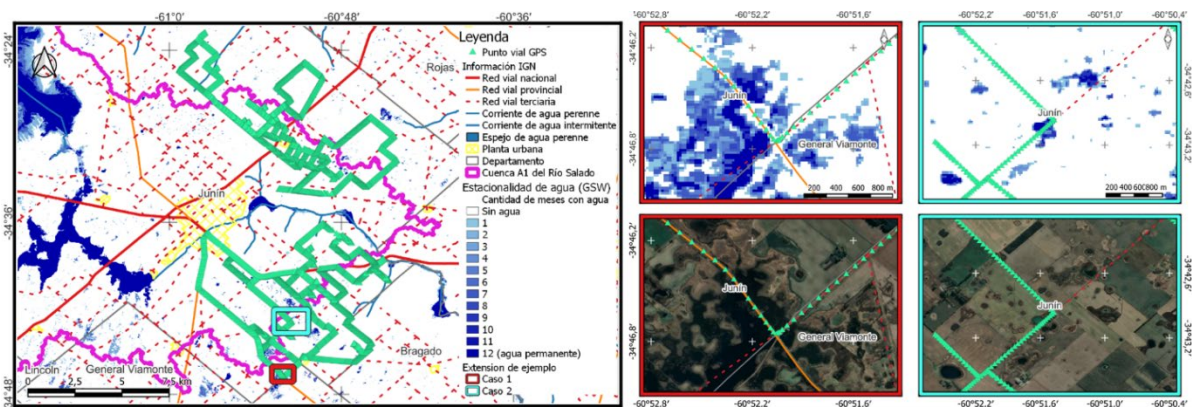


Figura B. 6. Estacionalidad del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.

Nota: Panel izquierdo: Vista regional mostrando la estacionalidad mediante escala cromática (tonos grises = sin agua, tonos celestes claros = estacional 1-3 meses, tonos celestes intermedios = estacional 4-6 meses, tonos azules = estacional 7-9 meses, tonos azules intensos = permanente 10-12 meses). Paneles derechos: Detalles para Caso 1 y Caso 2 con mapa de estacionalidad e imagen satelital.

Respecto al Caso 1, sobre la estacionalidad, confirma que los caminos no se encuentran afectados por presencia de agua en ningún mes del año. Los cuerpos de agua permanentes visibles en el área (representados en tonos azul intenso, con 10-12 meses de presencia de agua) corresponden a lagunas pampeanas estables localizadas en sectores deprimidos distantes de la red vial. Para el Caso 2, los caminos se intersectan o están adyacentes a áreas con agua de carácter marcadamente estacional, la cual es típica de áreas de anegamiento en llanura pampeana, donde el agua se acumula en depresiones durante eventos de precipitación intensa, permanece almacenada durante semanas a pocos meses debido a la baja capacidad de drenaje del terreno, y finalmente desaparece por evapotranspiración e infiltración lenta hacia el acuífero freático. Durante el período en que estas áreas presentan agua, los caminos que las atraviesan quedan intransitables para vehículos convencionales, requiriendo desvíos considerables o el uso de vehículos con mayor altura libre.

La información de estacionalidad es particularmente relevante para la planificación de actividades agropecuarias que requieren acceso vehicular en períodos específicos (siembra, cosecha, movimiento de ganado), permitiendo identificar meses del año en que determinados caminos presentan mayor probabilidad de estar impactados por agua.

El producto de transición del agua identifica cambios en el régimen hídrico de cada píxel entre el primer período (años iniciales de la serie 1984-1990 aproximadamente) y el último período (años finales 2014-2020 aproximadamente) de observaciones (Figura B. 7).

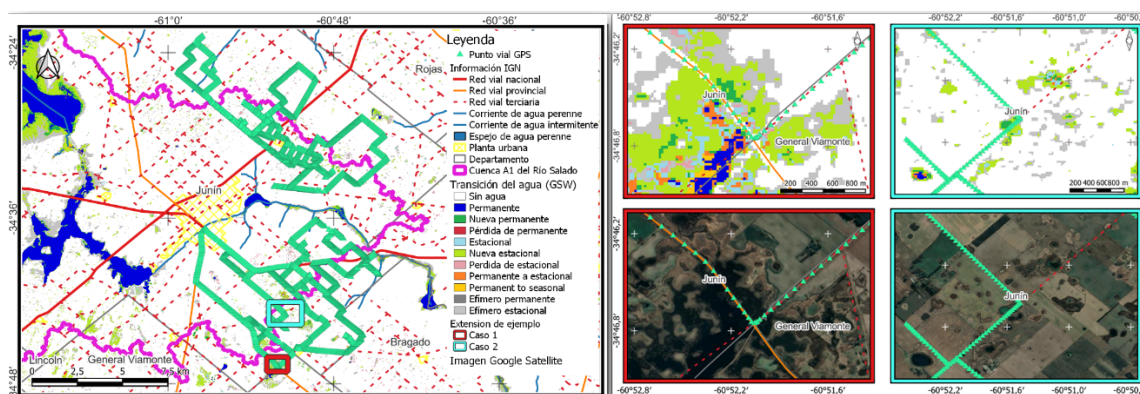


Figura B. 7. Transición del agua con los puntos GPS y la red vial para los dos casos de estudio.

Nota: Panel izquierdo: Vista regional mostrando las transiciones del agua mediante escala cromática multiclase (gris = sin agua, azul oscuro = permanente sin cambio, azul claro = nueva permanente, tonos verdes = transiciones estacionales, tonos amarillos/naranjas = diferentes categorías de cambio). Paneles derechos: Detalles para Caso 1 y Caso 2 con mapa de transiciones e imagen satelital.

El análisis del Caso 1, confirma que no se han producido cambios en el régimen hídrico en la zona de los caminos, que ha permanecido sin agua durante todo el período de análisis (1984-2020). Los cambios detectados en el paisaje circundante se concentran en las lagunas permanentes, algunas de las cuales muestran expansión de su superficie (categoría "nueva permanente") como consecuencia del período húmedo extraordinario 2012-2017 que afectó la región pampeana. Para el Caso 2, se muestra mayor complejidad en los patrones de transición, las áreas adyacentes o intersectadas por los caminos presentan cambios, incluyendo nueva estacional, que son áreas que no presentaban agua en el período inicial, pero comenzaron a exhibir anegamiento estacional en el período reciente. Este patrón puede vincularse al período húmedo extraordinario 2012-2017 (Anexo A), cuando las precipitaciones acumuladas excedieron significativamente la media histórica, saturando los suelos y activando procesos de anegamiento en áreas previamente secas; áreas de estacional sin cambio, que han mantenido un régimen de anegamiento estacional a lo largo de todo el período, indicando zonas con susceptibilidad crónica a inundación; y transiciones entre categorías permanente-estacional que reflejan la variabilidad interanual en la hidrología superficial, con cuerpos de agua que pueden comportarse como permanentes durante períodos plurianuales húmedos y contraerse a condición estacional durante períodos secos.

La presencia de la categoría "nueva estacional" en intersección con caminos rurales del Caso 2 evidencia un aspecto crítico: infraestructura vial que fue planificada y construida en un contexto hidrológico determinado (por ejemplo, en la década de 1980-1990) puede resultar vulnerable ante cambios en el régimen de precipitaciones y en la dinámica del agua superficial. Los caminos ubicados en zonas clasificadas como "nueva estacional" no experimentaban problemas de anegamiento en el pasado, pero en décadas recientes han comenzado a sufrir interrupciones recurrentes. Esta observación refuerza la necesidad de incorporar proyecciones de cambio climático y análisis de tendencias hidrológicas de largo plazo en la planificación de infraestructura en regiones de llanura.

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos sobre variabilidad hidrológica en la región pampeana, donde Bohn *et al.* (2011) documentaron la alternancia entre períodos secos y húmedos con impactos significativos en la extensión de cuerpos de agua superficial. La variabilidad

temporal observada en los productos GSWE para el período 1984-2020 refleja esta dinámica característica de ambientes de llanura con pendientes extremadamente bajas y densidad de drenaje reducida.

Compilando los resultados encontrados en la evaluación de las anteriores descripciones, se realizó una síntesis integrada de los cuatro productos del GSWE (extensión máxima, recurrencia, estacionalidad, transición) con la información altimétrica GPS, para así proponer y establecer una jerarquización comprehensiva de la vulnerabilidad de diferentes segmentos de la red vial rural en el partido de Junín. La Tabla B. 1 agrupa los criterios de clasificación y las recomendaciones de gestión asociadas a cada categoría.

Tabla B. 1. Jerarquización de vulnerabilidad y transitabilidad vial según productos GSWE y criterios de gestión municipal.

Categoría de Vulnerabilidad	Criterios GSWE	Características Altimétricas	Frecuencia de Afectación	Recomendaciones de Gestión
BAJA (Tipo Caso 1)	Extensión máxima: No intersección Recurrencia: 0% Estacionalidad: 0 meses Transición: Sin cambios	Cotas relativamente elevadas en contexto local (> 80 m s.n.m. en área Junín) Distancia a cuerpos de agua > 1-2 km	Sin afectación histórica en 36 años	Mantenimiento vial rutinario. Sin necesidad de obras especiales de protección contra inundación.
MEDIA	Extensión máxima: Intersección marginal Recurrencia: < 15% Estacionalidad: 1-2 meses Transición: Sin cambios significativos	Cotas intermedias (78-80 m s.n.m.) Distancia moderada a zonas de acumulación	Afectación esporádica: 1 evento cada 6-10 años	Monitoreo durante eventos de precipitación intensa. Considerar obras menores: mejora de cunetas, alcantarillas de mayor sección en puntos críticos. Señalización de tramos susceptibles.
ALTA (Tipo Caso 2)	Extensión máxima: Intersección o adyacencia directa Recurrencia: 20-40% Estacionalidad: 3-6 meses Transición: Presencia de "nueva estacional"	Cotas bajas en contexto local (< 77 m s.n.m.) Proximidad inmediata (< 500 m) a zonas de acumulación	Afectación frecuente: 1 evento cada 3-5 años Interrupción durante 3-6 meses en años húmedos	PRIORIZACIÓN ALTA para obras de mejoramiento: 1) Elevación de rasante (+0.5-1.0 m mediante terraplenes) 2) Alcantarillas de sección adecuada 3) Sistema de cunetas mejorado 4) Señalización de tramos críticos 5) Rutas alternativas para períodos de afectación
MUY ALTA	Extensión máxima: Atravesando cuerpos permanentes Recurrencia: > 75% Estacionalidad: > 10 meses Transición: Permanente o nueva permanente	Cotas al nivel de espejos de agua permanentes Proximidad inmediata (< 100 m) o intersección directa	Afectación crónica: agua presente la mayor parte del año	PRIORIZACIÓN CRÍTICA: 1) Evaluación de relocalización de traza vial 2) Construcción de caminos elevados (terraplenes altos, > 1.5 m) 3) Puentes en cruces de cursos 4) Alternativamente: aceptar interrupciones estacionales y provisión de rutas alternativas obligatorias

Nota. Las cotas altimétricas son específicas para el contexto del partido de Junín; en otras áreas de la cuenca A1 los valores absolutos pueden diferir, pero los criterios relativos (diferencias entre zonas vulnerables y no vulnerables) se mantienen. La frecuencia de afectación se basa en el análisis de 36 años de datos GSWE (1984-2020).

Del análisis de los caminos rurales relevados con GPS e integrados con productos GSWE, se estima que: aproximadamente un 45-50% de la red vial presenta BAJA vulnerabilidad (tipo Caso 1), no requiriendo obras especiales más allá del mantenimiento rutinario; el 25-30% presenta vulnerabilidad MEDIA, requiriendo monitoreo y obras menores de mejoramiento; el 20-25% presenta vulnerabilidad ALTA (tipo Caso 2), requiriendo priorización para obras significativas de elevación de rasante y/o alcantarillado; y el 5-10% presenta vulnerabilidad MUY ALTA, requiriendo intervenciones críticas o en casos extremos, relocalización.

Estos porcentajes implican que entre 100 a 150 km de caminos rurales en el partido de Junín relevados, requieren inversión prioritaria en obras de mejoramiento para garantizar transitabilidad confiable durante eventos de excesos hídricos. La identificación espacialmente explícita de estos tramos mediante la metodología presentada contribuirá a argumentar la focalización de los recursos municipales limitados en los sectores donde la inversión generará mayor beneficio en términos de reducción de vulnerabilidad.

El levantamiento GPS cinemático realizado permitió obtener un modelo de elevación detallado de la red vial rural, con precisión decimétrica adecuada para la identificación de sectores deprimidos susceptibles a anegamiento. La integración de esta información altimétrica con los productos satelitales del GSWE constituye un enfoque metodológico innovador en el contexto regional, siguiendo experiencias internacionales que han empleado técnicas similares de superposición espacial entre redes viales e información de peligro de inundación derivada de teledetección, como lo trabajo también Alarifi *et al.* (2022).

B.4. Conclusiones

El presente caso de estudio complementario desarrolló e implementó una metodología de integración entre levantamientos GPS cinemáticos de alta precisión sobre infraestructura vial rural y productos satelitales de largo plazo del Global Surface Water Explorer (GSW), con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de caminos rurales ante eventos de excesos hídricos en el partido de Junín, provincia de Buenos Aires.

La metodología de levantamiento GPS cinemático, obtuvo cotas con exactitud del orden decimétrico (15-20 cm) sobre caminos rurales. Este procedimiento incluyó una doble validación externa completamente independiente entre procesamiento relativo (respecto a estación base UNNOBA), que condujo a estimar una confiabilidad de los resultados satisfactoria. Considerando las irregularidades propias de los caminos rurales (huellas, montículos, erosión diferencial), la precisión altimétrica alcanzada resulta adecuada para caracterizar diferencias de cota, que son las que determinan la susceptibilidad a inundación en ambientes de llanura extremadamente plana como la pampa deprimida.

La integración mediante SIG de la información altimétrica GPS con los productos temáticos del GSWE (extensión máxima de agua, recurrencia, estacionalidad y transición) generó cartografía que contribuye a identificar y jerarquizar segmentos de la red vial rural según su grado de vulnerabilidad ante inundación. Esta integración constituye un aporte metodológico replicable en otras áreas de la cuenca A1 y en regiones con características geomorfológicas similares.

La vulnerabilidad de la red vial rural presenta marcada variabilidad espacial, con sectores que no han experimentado afectación por agua en 36 años (Caso 1 - Baja vulnerabilidad) coexistiendo con sectores que enfrentan interrupciones recurrentes cada 3-5 años (Caso 2 - Alta vulnerabilidad). Esta heterogeneidad está controlada principalmente por dos factores: (a) posición altimétrica relativa, donde diferencias de apenas 3-5 m determinan susceptibilidad, y (b) proximidad a zonas de acumulación preferencial de agua identificadas mediante productos GSWE.

La información generada constituye una herramienta de diagnóstico cuantitativo que permite fundamentar decisiones de inversión pública en mejoramiento vial con criterios objetivos, basados en evidencia satelital de 36 años sobre la dinámica histórica del agua superficial. Las autoridades municipales disponen ahora de cartografía que identifica espacialmente los tramos críticos, cuantifica la magnitud del problema (recurrencia y estacionalidad), y proporciona recomendaciones específicas de gestión para cada categoría de vulnerabilidad.

La implementación de esta metodología integrada requiere necesariamente un enfoque transdisciplinario que combine capacidades en geodesia satelital, teledetección, análisis espacial, hidrología de llanura, e ingeniería vial.

Los resultados alcanzados mediante la metodología presentada, plantea una integración GPS-GSWE, que fue presentada en el II Congreso Multidisciplinario de la UNNOBA "Ciencia y Tecnología para el desarrollo sostenible" (22-23 de septiembre de 2022, Pergamino, Buenos Aires), contribuyendo al diálogo entre academia, gestión pública y sector productivo sobre estrategias de adaptación ante la variabilidad hidrológica en la región pampeana. El enfoque desarrollado se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente contribuyendo al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) mediante el indicador 6.6.1 de monitoreo de ecosistemas acuáticos, al ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) mediante la mejora de infraestructura resiliente, y al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) mediante la planificación territorial que considera la vulnerabilidad ante desastres naturales.

B.5. Bibliografía

Abdulla, B., Kiaghadi, A., Rifai, H. S., & Birgisson, B. (2020). Characterization of vulnerability of road networks to fluvial flooding using SIS network diffusion model. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1, Artículo 6. <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00004-z>

Alarifi, S. S., Abdelkareem, M., Abdalla, F., & Alotaibi, M. (2022). Flash flood hazard mapping using remote sensing and GIS techniques in southwestern Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(21), Artículo 14145. <https://doi.org/10.3390/su142114145>

Bohn, V. Y., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). Análisis de los periodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de Climatología*, 11(3), 31-43.

Fan, C., Jiang, X., & Mostafavi, A. (2020). A network percolation-based contagion model of flood propagation and recession in urban road networks. *Scientific Reports*, 10, Artículo 13481. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70524-x>

Gaspari, F. J., Montealegre Medina, F. A., Simontacchi, L., Perdomo, S., Gómez, M. E., Fariña, L., & Perdomo, R. (2022). Avance en la prevención del riesgo hidrológico en el partido de Junín. En *II Congreso Multidisciplinario de la UNNOBA: "Ciencia y Tecnología para el desarrollo sostenible"*,

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino, Buenos Aires.
<https://congresomultidisciplinario.unnoba.edu.ar/>

Gómez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., & Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: Correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geológica Lilloana*, 29(1), 39–51. <http://www.lillo.org.ar/revis/geo/2017/v29n1/v29n1a03.pdf>

Gómez, M. E., Perdomo, R., Simontacchi, L., Perdomo, S., Tavarone, M. F., Del Cogliano, D., Vázquez, M., & Tessone, N. (2018). Modelo digital de elevaciones para la subregión A1 del plan maestro del Río Salado y para la ciudad de Junín. *Geoacta*, 43(1), 31-50.
<https://revistas.unlp.edu.ar/geoacta/article/view/13327>

Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (s.f.). *Capas SIG: Base de Datos Geoespacial Institucional* [Conjunto de datos geoespaciales] (recuperado el 15 de noviembre de 2017).
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

Kruse, E., & Ainchil, J. (2017). Relación de agua superficial y subterránea en la llanura de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74(1), 4-16.

Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan maestro integral de la cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica.
https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.
<https://doi.org/10.1038/nature20584>

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2021). *Progress on freshwater ecosystems: Tracking SDG 6 series – Global indicator 6.6.1 updates and acceleration needs*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36691>

World Bank. (2021). *Climate change risk analysis of Argentina's land transport network*. World Bank Group. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/195711635419179910/pdf/Climate-Change-Risk-Analysis-of-Argentina-s-Land-Transport-Network.pdf>

World Bank. (2024). *Flood risk management in Argentina: An evolutionary road to an integrated approach*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/results/2023/12/19/flood-risk-management-in-argentina-an-evolutionary-road-to-an-integrated-approach>

C. Anexo Capítulo 8. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO. GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®.²⁰

C.1. Introducción

La modelización hidrológica es una herramienta clave para comparar los escenarios de gestión y el cambio de uso del suelo en cuencas hidrográficas (de Antueno *et al.*, 2020). La interacción entre modelos hidrológicos y de proyección cartográfica del uso del suelo es relativamente fiable, dada por la eficacia y exactitud espacial que le otorga el manejo de bases de datos geográficos, integrados a un Sistema de Información Geográfico (SIG) (Sandoval y Oyarzun, 2004; Rodríguez Vagaría *et al.*, 2014; Gaspari *et al.*, 2019, 2021). Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a explorar los cambios de uso del suelo y sus variables sociales, económicas y espaciales; proyectar potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo; y evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo *et al.*, 2007).

El cambio de uso del suelo genera una transformación importante en la dinámica del agua superficial y subterránea, debido al aumento del cubrimiento del suelo, eliminación de una cobertura vegetal absorbente, aumento de la extracción de agua de los acuíferos para riego, entre otros (Rodríguez Vagaría *et al.*, 2014). La cuantificación del excedente superficial de una lluvia constituye la base en la planificación del recurso agua, sea para aumentar el proceso de infiltración en el suelo con el fin de mantenerla disponible para los cultivos, como para disminuir los caudales pico generadores de inundaciones por desborde de los cauces (Rodríguez Vagaría & Gaspari, 2010). Históricamente, la región pampeana argentina maneja los excesos hídricos a través de la implementación de obras de saneamiento y/o canalización, que comprenden el dragado y/o construcción de canales que desvían los cursos de agua o drenan el agua de áreas anegables, y hay la implementación de prácticas culturales de manejo y uso del suelo. En relación con este tipo de prácticas, las actuaciones en las cuencas hidrográficas pueden sintetizarse en dos líneas, totalmente compatibles y, en cierta medida, complementarias. Estas son, la utilización racional de las áreas de cultivo (que cubren las zonas de menores pendientes y suelos más fértiles) y el establecimiento de una cubierta vegetal protectora en el resto del territorio que puede adquirir distintas formas tales como praderas, landas, áreas de matorral o monte bajo y finalmente zonas de bosque, bien sean de repoblación o naturales (Mintegui Aguirre & López Unzu, 1990). La restauración agro-hidrológica trata de englobar, en un plan unificado de acción, la problemática común a suelos, agua y vegetación de las cuencas conduciendo a un auténtico proceso de ordenación (Rodríguez Vagaría & Gaspari, 2010). Para ello se combina al proceso espacial productivo con la modelización hidrológica que le otorga la variable hídrica.

Los métodos hidrológicos tradicionales que simulen el proceso de la precipitación- escorrentía son difíciles de implementar debido a que los datos meteorológicos son generalmente escasos. Actualmente, muchos de estos datos son generados con SIG, como base de entrada a modelos hidrológicos tradicionales, pero presentan incompatibilidades entre la estructura y las características geográficas y digitales (Rango, 1985; Shi *et al.*, 2007). Zhan y Huang, (2004) han desarrollado una

²⁰ Montealegre Medina, F. A., & Gaspari, F. J. (2021). GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®. Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal, 9. (2), 170–192. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1289>

herramienta informática denominada ArcCN-Runoff, una extensión del programa ESRI ArcGIS[®] que determina que calcula la relación escorrentía- infiltración para una precipitación a nivel de cuenca hidrográfica. Otro ejemplo, es la herramienta GeoQ para Idrisi Andes[®], generada por Rodríguez Vagaría y Gaspari (2010), que permite estimar descargas y predecir la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica según se asocie a posibles cambios de uso del suelo, por ejemplo, implementación de medidas de conservación de suelo (que inducen a modificaciones sobre la topografía, cubierta vegetal, grado de ocupación del terreno), el desarrollo de una urbanización, entre otros. Como menciona (Eastman, 2006) estas herramientas constituyen modelos geoespaciales automatizados y utilizados para la obtención de nueva información útil para el análisis de la hidrología de superficie

En la actualidad, el software libre QGis[®] es una aplicación profesional de SIG de Código Abierto (FOSS) licenciado bajo GNU - General Public License, que proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos, para visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas. Los complementos permiten extender la funcionalidad de QGis utilizando Python, comprendiendo un entorno gráfico para la construcción y ejecución de modelos de pasos múltiples, para procesar mapas temáticos a través de modelos matemáticos. Estas capas temáticas pueden ser expresadas como una base de datos tabular, vectorial y/o en grilla.

El objetivo del trabajo fue generar la herramienta de procesamiento automático geoespacial GeoQ para el cálculo del escurrimiento superficial, bajo entorno QGis[®].

C.2. Materiales y métodos

La precipitación constituye la principal fuente de agua para el desarrollo de las actividades productivas de una cuenca hidrográfica. El exceso de precipitación, también denominado precipitación efectiva-escorrentía superficial, es la lluvia que no se retiene ni se infiltra en el suelo. La abstracción inicial consiste, principalmente, en la interceptación, la infiltración durante los primeros momentos de la tormenta, y el almacenaje superficial de pequeñas depresiones del terreno (Mockus, 1972; Kent, 1973; Chow *et al.*, 1994; Mishra & Singh, 2003).

El Número de curva (NC) mencionado por el Soil Conservation Service (SCS) (Mockus, 1972), es un método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo y para distintas condiciones de humedad antecedente (Chow *et al.*, 1994). Este permite calcular la abstracción inicial en una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento superficial. El NC determina un complejo suelo-vegetación que define sus condiciones hidrológicas, y las pérdidas por infiltración – escorrentía (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Marek, 2011). El NC presenta valores entre 0-100, donde a mayor valor, la escorrentía es predominante, y disminuye infiltración (López Cadena de Llano, 1994; Gaspari *et al.*, 2010).

El método de NC permite estimar la precipitación efectiva definiendo la escorrentía superficial (Q), que se expresa en la Ecuación C. 1. El procedimiento se inicia con la cuantificación de las abstracciones iniciales (I_0) según la Ecuación C. 2, a partir de la retención potencial máxima (S). Para la obtención del valor de S se utiliza el NC y la expresión de la Ecuación C. 3 (Gaspari *et al.*, 2013). Siendo el NC, la combinación del grupo hidrológico de suelo según clase textural (GH), las clases de coberturas y usos del suelo, según la condición de humedad antecedente del suelo (CHA). La infiltración (F) es la

proporción de P que se infiltra al interior del suelo, considerándose como una abstracción continuada, representada por la Ecuación C. 4 (Mockus, 1972; Kent, 1973; Gaspari *et al.*, 2013, 2015).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4 * I_0} \quad \text{Ecuación C. 1}$$

$$S = 254 * \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad \text{Ecuación C. 2}$$

$$I_0 = 0,2 * S \quad \text{Ecuación C. 3}$$

$$F = \frac{S * (P - I_0)}{P - I_0 + S} \quad \text{Ecuación C. 4}$$

Donde P es la precipitación efectiva; I_0 Abstracciones iniciales; S Retención potencial máxima; F Infiltración.

Integrando los conceptos anteriores se puede establecer una ecuación básica, la cual la suma de sus componentes es el total del valor de lluvia precipitada, siendo esta $P = Q + I_0 + F$. Del total de agua de lluvia que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se evapora, otra discurre por la superficie (escurrimiento) y otra penetra en el terreno (infiltración), con base en esto también es útil conocer sus respectivos coeficientes, los cuales son sus respectivos valores respecto al total precipitado P, como se muestra en la Ecuación C. 5 (Mockus, 1972; Kent, 1973; Gaspari *et al.*, 2010, 2013).

$$CE = \frac{Q}{P} \quad CI_0 = \frac{I_0}{P} \quad CF = \frac{F}{P} \quad \text{Ecuación C. 5}$$

Siendo CE el coeficiente de escorrentía; CI_0 el coeficiente de abstracciones iniciales y CF el coeficiente de infiltración.

Por ende, el porcentaje total de precipitación está dado por P (%) siendo la sumatoria de CE, CI_0 y CF (Gaspari *et al.*, 2013).

El NC se presenta en tablas que integra complejos GH-vegetación de características semejantes, que responden de manera análoga bajo el efecto de una tormenta de intensidad variable aplicado para diferentes condiciones de humedad antecedente (CHA) al momento de producirse una precipitación. Si la lluvia total antecedente a 5 días es menor a 12,7 mm y el suelo se presenta seco, CHA. se denomina I. Si la lluvia es entre 12,7 y 38,1 mm, es decir en condiciones normales, se denomina CHA II. Por último, si el suelo se encuentra húmedo, por una lluvia antecedente mayor a 38,1 mm, CHA es III (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Chow *et al.*, 1994; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari *et al.*, 2010, 2013).

La cuantificación de la escorrentía se determinó a través del método de NC y la generación de un modelo cartográfico para su representación geográfica automática, se utilizó el diseñador de modelos del QGIS 3.18.Zurich®, desarrollando el modelo denominado GeoQ como un nuevo complemento para la construcción y procesamiento analíticos, basados en archivos vectoriales, estableciendo un potente

sistema de modelización hidrológica, generando como resultado final un mapa de distribución espacial de la lámina de escorrentía, en milímetros.

La zonificación y modelización de la escorrentía bajo entorno SIG con GeoQ, se estableció por medio de la creación del modelo matemático que responde a las tres CHA (I, II, III).

Como ejemplo de aplicabilidad del procesamiento automático de GeoQ, se procedió al estudio de caso de cuatro áreas testigo en la provincia de Buenos Aires, Argentina, siendo: una al noroeste con la cuenca A1 del Río Salado y las cuencas altas del Río Sauce Grande y del A°. Pillahuinco Grande en el Sistema de Ventania y la del A°. Napaleofú en el Sistema de Tandilia (Figura C. 1). Para ejemplificar el cálculo de la escorrentía con GeoQ se aplicó una lluvia modal regional de 80,1 mm para las tres CHA, a partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional, en el período 1990 – 2020.

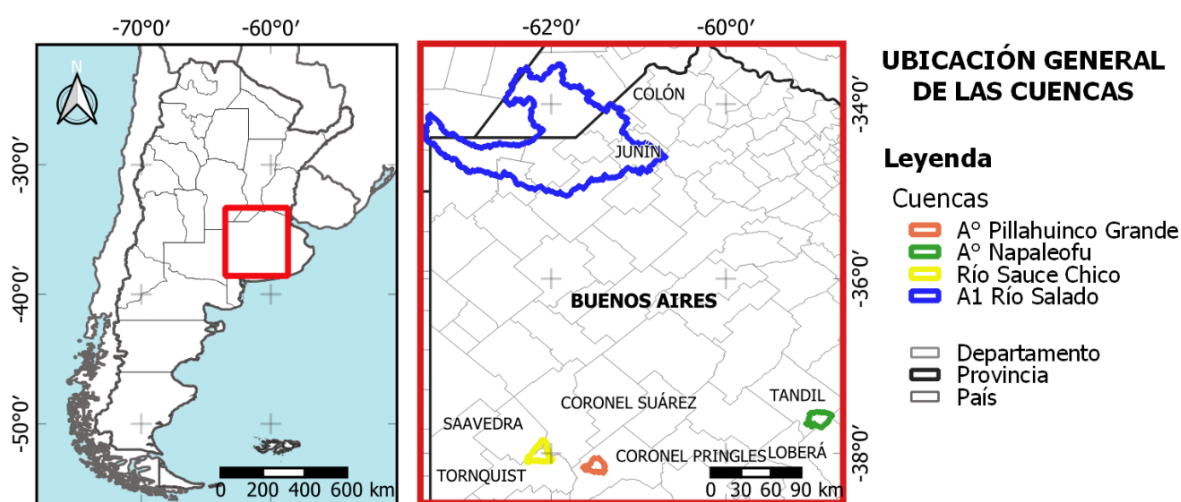


Figura C. 1. Distribución geográfica de las cuencas hidrográficas testigo para la aplicación de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

C.2.1. Construcción y procesamiento de GeoQ

El GeoQ genera mapas intermedios que conforman los archivos de entrada durante las múltiples secuencias para la obtención de la zonificación de la escorrentía superficial en la cuenca (Q). La Figura C. 2 expresa el flujo de la secuencia del procesamiento bajo el entorno gráfico de pasos múltiples, de archivos vectoriales, asignación automática de valores, operaciones matemáticas entre mapas y reclasificación de categorías para el procedimiento interconectado dinámico. Este flujo está basado en geoprocesos, inicialmente con la intersección de las capas vectoriales, para establecer zonas del complejo suelo vegetación, cuyo resultado es una base cartográfica, a la cual se le define el valor de precipitación a modelar, por medio de generación de nuevos campos y cálculos matemáticos. Posteriormente, se realiza una unión de tablas a dicha base para incorporar los valores de NC de las tablas de consulta, estructuradas previamente. Por último, se generan nuevos campos con consultas por la aplicación de las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, para dar como resultado el mapa de abstracciones, escorrentía e infiltración en archivos vectoriales. Como producto final de la herramienta GeoQ se generan los mapas de coeficiente de abstracciones, escorrentía e infiltración, al aplicar la Ecuación C. 5.

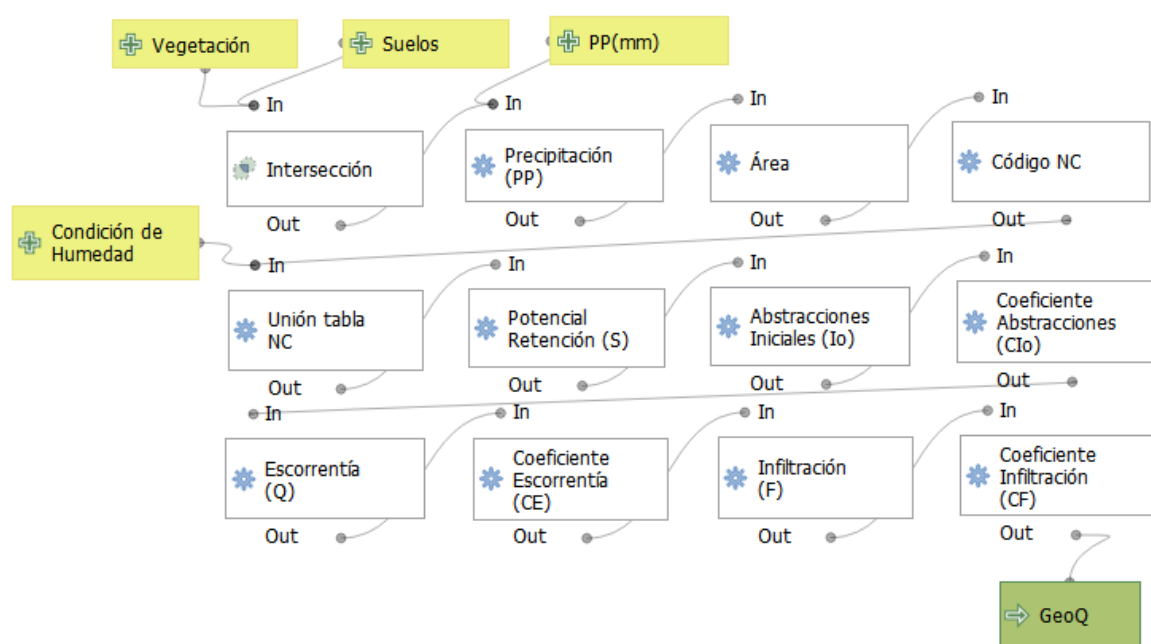


Figura C. 2. Entorno gráfico de la modelación espacial de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

El GeoQ requiere de tres grupos de datos de inicio (Figura C. 3), según:

1. El valor de la cantidad de precipitación (en milímetros) de la tormenta a modelar (**PP (mm)**).
2. Dos archivos vectoriales de tipo polígono: la zonificación del grupo hidrológico (GH) y la distribución de la vegetación y/o uso del suelo (VU) en la cuenca modelada (**Suelos**, **Vegetación**, respectivamente).
3. Un archivo tabular (archivo delimitado por comas (csv)) que expresa la condición de Humedad antecedente (**Condición de Humedad**), aportado por el GeoQ.

Para finalizar se pedirá el nombre y ruta del archivo resultante, en la casilla denominada **GeoQ**. Si el usuario no escoge un nombre y ubicación específica, el complemento genera una capa temporal denominada GeoQ con los resultados del modelo, la cual puede ser visualizada para guardar posteriormente, antes de cerrar el programa QGis.

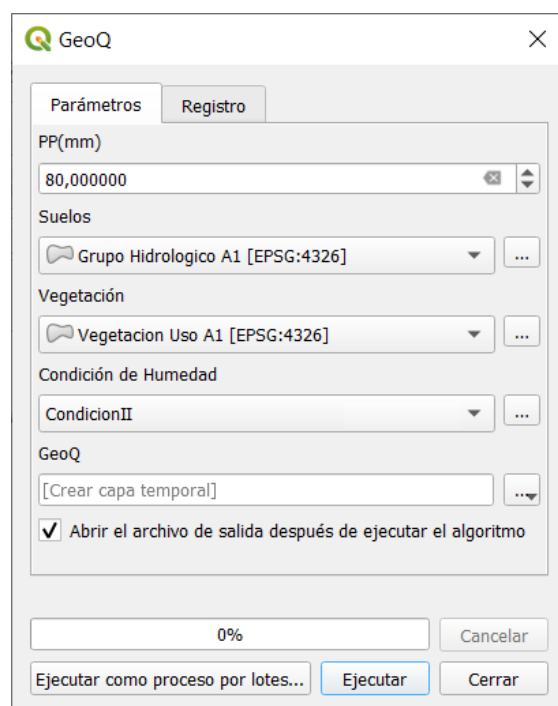


Figura C. 3. Interfaz gráfica del modelo cartográfico de GeoQ. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

C.2.2. Estudios de caso para aplicación de GeoQ

La caracterización particular de la vegetación y/o uso del suelo (VU) se basó en clases según cartografía antecedente de Cobertura del Suelo de la República Argentina (Volante, 2009), Proyecto PNECO 1643 (INTA, 2009) y cartografía de clases definidas según Vegetación y/o uso del suelo de la clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990). Ésta fue aplicada en el estudio de caso de las cuatro áreas testigo, siendo las clases expresadas con los códigos de la Tabla C. 1 y se representan en la Figura C. 4.

Los datos de inicio para cada caso de estudio se identificaron y zonificaron según:

1. El dato de atributos de la lluvia aplicada se coloca en forma manual al ejecutar el modelo GeoQ.
2. El mapa de caracterización y zonificación de la cobertura vegetal y uso del suelo (VU) (Figura C. 4 (a)). El archivo de VU debe ser expresado según los códigos de la Tabla C. 1.
3. La distribución del grupo hidrológico de suelo (GH) se adaptó según denominación del SCS, a los que asignó una capacidad de infiltración según la textura, y se aplicó el código requerido por GeoQ: A=1, B=2, C=3 y D=4, (Figura C. 4 (b)) (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Chow *et al.*, 1994; López Cadena de Llano, 1994; Neilsen & Hjelmfelt, 1998; Mishra & Singh, 2003; Gaspari *et al.*, 2010, 2019).
4. Además, en el modelo se debe incorporar el CHA según necesidad del usuario.

Tabla C. 1. Códigos de vegetación y/o uso del suelo asignados al mapa vegetación y su correspondiente NC según GH en CHA II. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

Código	Cobertura del Suelo de la República Argentina. Proyecto PNECO 1643. Año 2006-2007 (2009)	Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990)	NC II GH A	NC II GH B	NC II GH C	NC II GH D
20	Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Cultivos alineados R P	72	81	88	91
30	Cultivos de herbáceas graminoides	Cultivos alineados R B	67	78	85	89
50		Cultivos alineados C B	65	75	82	86
110		Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
150	Cultivos de herbáceas no graminoides	Cultivo denso leguminosa R B	58	72	81	85
170		Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
220		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
250	Arbustal cerrado	Montes con pastos B	25	55	70	77
280	Bosques abiertos, con arbustos	Bosques R	36	60	70	76
300	Bosques cerrados	Bosques MB	15	44	54	61
310	Áreas terrestres cultivadas y/o manejadas	Prados permanentes	30	58	71	78
320	Pastizal abierto (herbáceas graminoides)	Pastizal P	68	79	86	89
330	Pastizal disperso	Pastizal R	49	69	79	84
390	Áreas urbanas densamente pobladas	Residencial alta densidad	77	85	90	92
410	Cuerpos de agua en movimiento - cañadas	Espejos de agua - humedales	100	100	100	100
450	Áreas urbanas dispersas - semiurbanas		57	72	81	86
490	Cultivos de especies arbóreas (no determinado)		49	65	75	79
550	Suelos pedregosos		91	91	91	91
580	Vegas de ríos en condiciones óptimas		30	58	71	78

Referencias: R Laboreo sin prácticas de conservación; C Curvas de nivel; C-T Curvas de nivel y Terrazas abiertas; MP Condición de infiltración muy pobre; P Condición de infiltración pobre; M Condición de infiltración mala; B Condición de infiltración buena; MB Condición de infiltración muy buena.

Conociendo el GH al que corresponden los diferentes suelos y la distribución de VU, el complemento GeoQ establece automáticamente el valor del NC en las diferentes zonas de interceptación de la cuenca, por un procesamiento de tabulación cruzada.

El NC se define según la Tabla C. 1, que corresponde a la situación de humedad antecedente del suelo media (condición II) establecido de documentación de referencia (Kent, 1968; Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari & Senisterra, 2006; Gaspari, 2007).

Los valores del NC generados por el modelo GeoQ para los cuatro casos de estudio variaron entre 15, representando Bosques cerrados, hasta alcanzar máximos de 100, indicando Cuerpos de agua en movimiento - cañadas, como se muestra en la Figura C. 4. La modelización con GeoQ se realizó para las tres CHA.

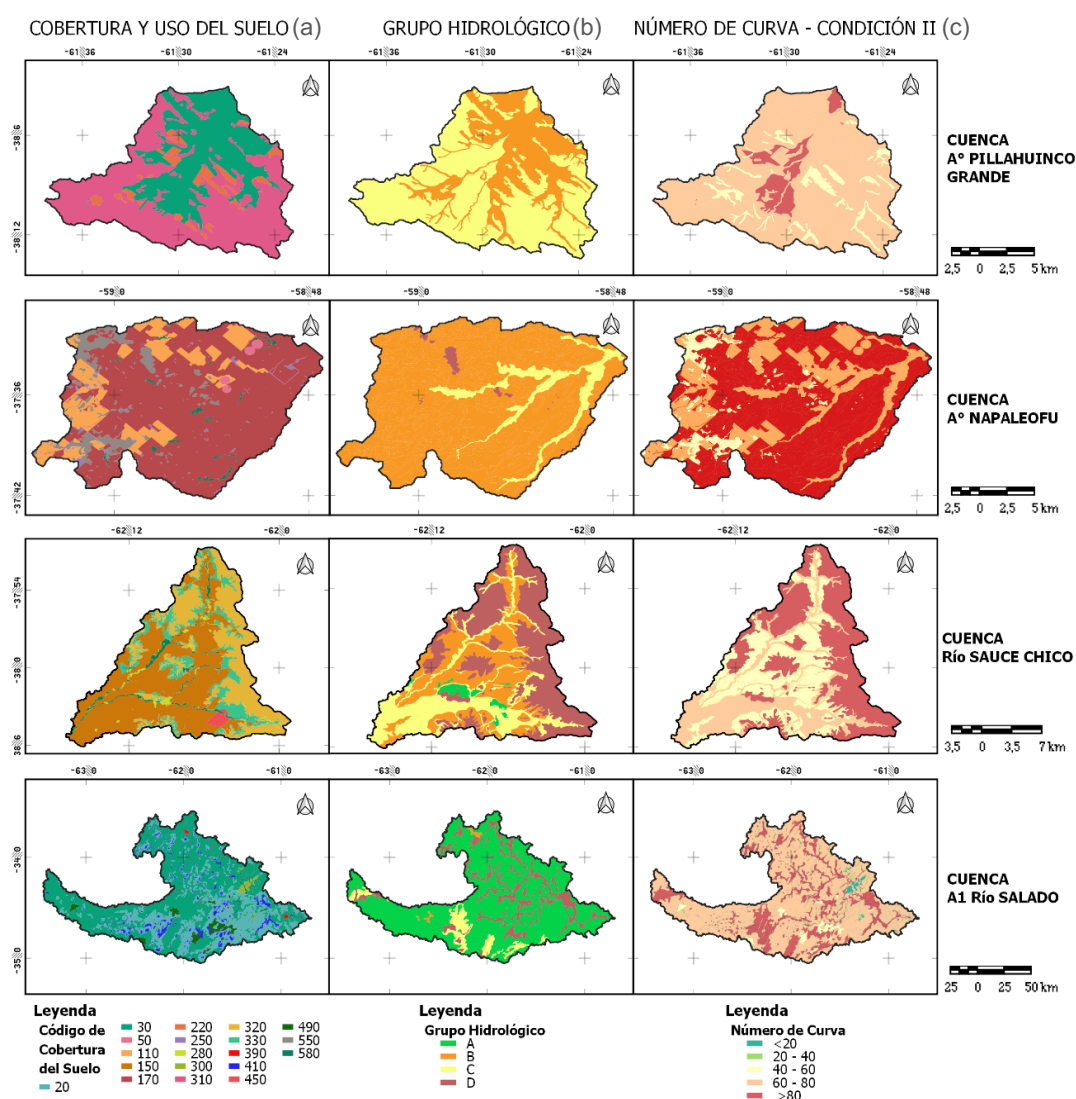


Figura C. 4. Base de datos cartográfica de las cuencas en estudio. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

C.3. Resultados y discusión

Los resultados alcanzados de la modelación con GeoQ, sobre los ejemplos de aplicación en cuencas testigo, arrojan un único archivo, donde se encuentran los valores de Q , I_0 y F , con sus correspondientes coeficientes CE , CF y CI_0 .

Los resultados de la modelación con GeoQ en las cuencas en estudio para las tres CHA, de los diferentes coeficientes hidrológicos, permite la comparación de cada uno, y su representación cartográfica se expone en: la CI_0 en la Figura C. 5, CE en la Figura C. 6, CF en la Figura C. 7.

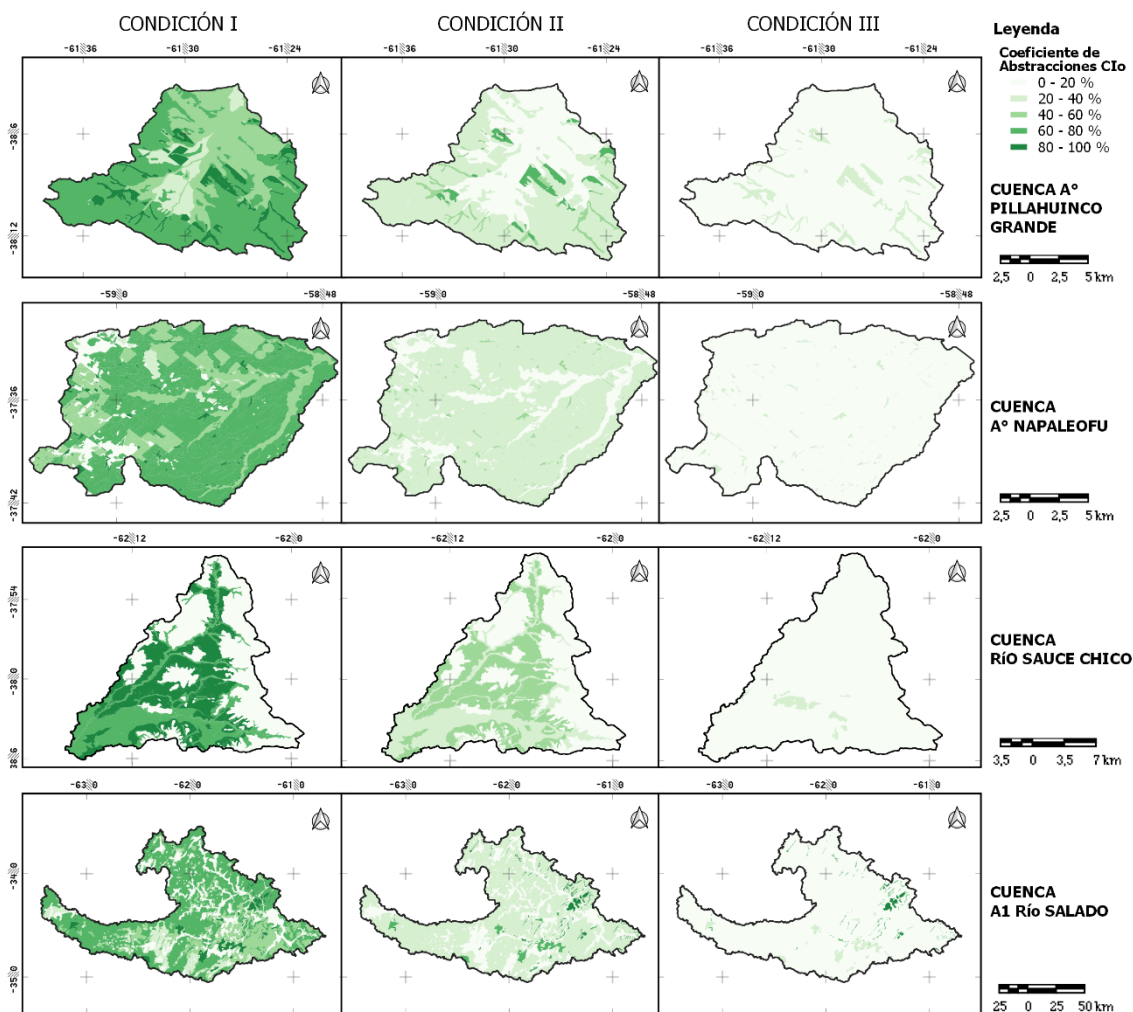


Figura C. 5. CI_0 de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

Las abstracciones iniciales (I_0) (Figura C. 5) están ligadas fuertemente a las características de las cobertura vegetal y tipo del suelo para cada cuenca, las cuales se ven reflejadas en los valores de NC. Se observó que los CI_0 más altos se encuentran en la CHA I, >60 %, donde hay presencia de vegetación densa o agricultura extensiva, con el suelo inicialmente seco. En la CHA II el CI_0 se reduce a valores <40 %, lo cual es considerable respecto a la condición anterior, debido a que la capacidad de las plantas para retención de agua se encuentra en condiciones normales. En la CHA III disminuyen a valores <20%, conforme a que el complejo suelo-vegetación está totalmente saturado, generando así la leve a nulidad de las abstracciones.

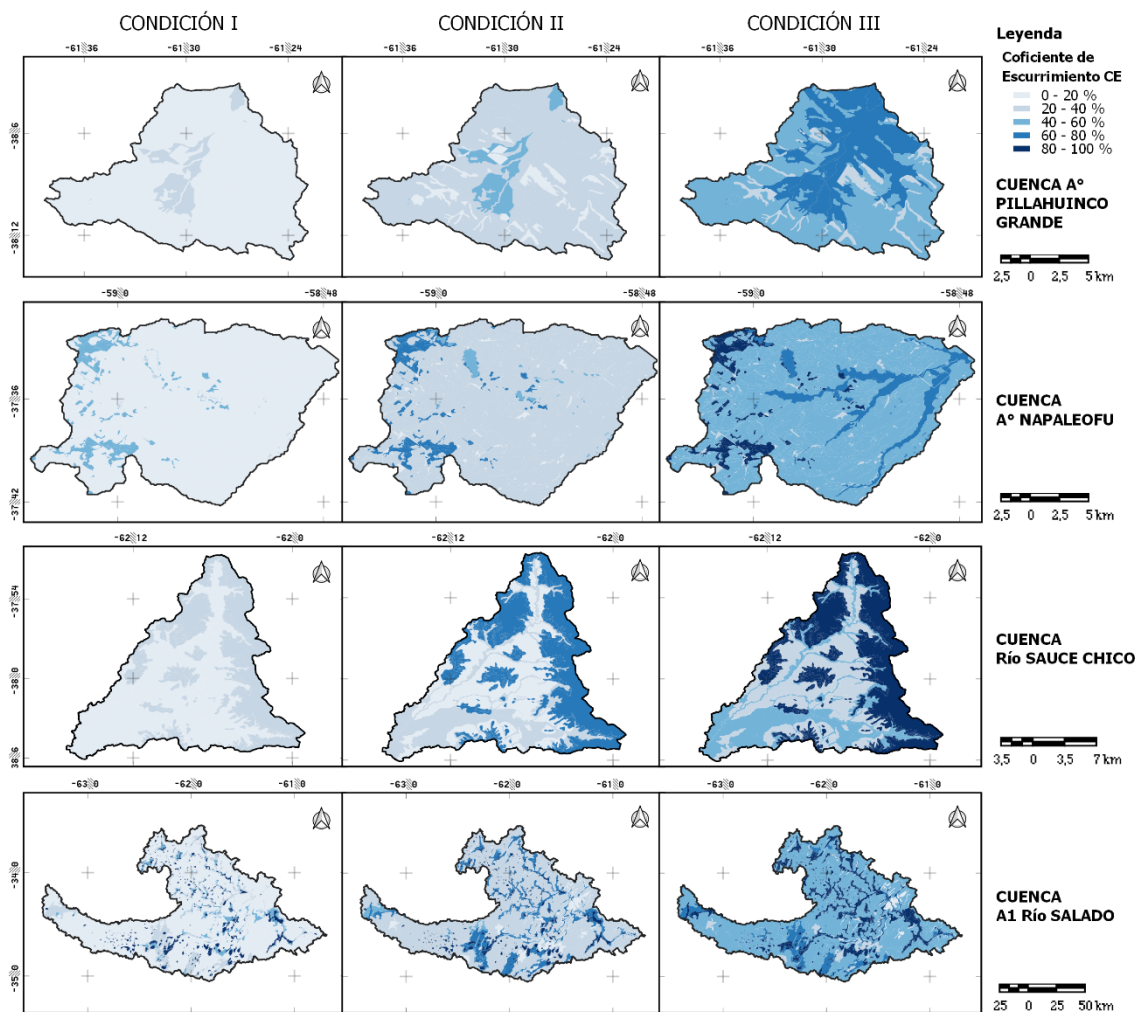


Figura C. 6. CE de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

Respecto al CE (Figura C. 6), se observa que en la CHA I, se presenta poco escurrimiento, mostrando que en la mayor superficie de las cuencas estudiadas se encuentran valores de $< 20\%$, y aumenta en zonas donde hay presencia de agua permanente o vegas de drenaje, siendo representativo de que en la CHA I el suelo se encuentra seco y no se genera una escorrentía considerable.

A medida que incrementa la CHA, mayor es Q, ya que existe una saturación teórica previa que origina que la precipitación colmate el suelo y la cobertura vegetal más fácilmente, y se genere escorrentía superficial. En las CHA II se observa CE entre el 40 y 60 % en la mayor superficie de todas las cuencas y en las CHA III se observa que CE predomina con valores > 60 y 80 %.

La infiltración representada por el CF en la Figura C. 7, presenta un mayor valor en el CHA II, y disminuye considerablemente en la CHA III, debido a que, en esta última condición el mayor porcentaje de la precipitación se refleja en la escorrentía (CE), y la saturación del suelo que es alta.

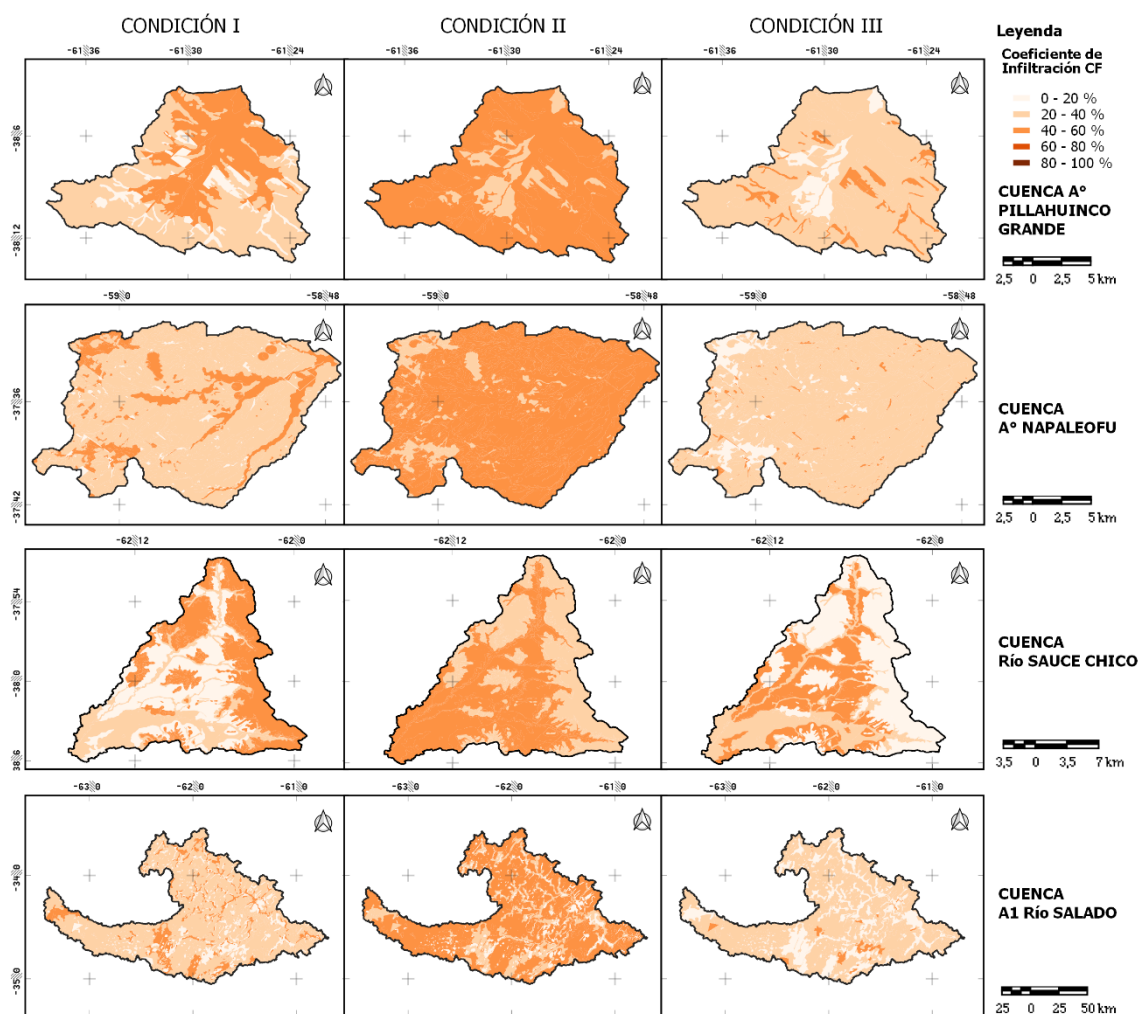


Figura C. 7. CF de GeoQ según la condición de humedad antecedente. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

En el proceso de modelación con GeoQ se identificó que las fórmulas de I_0 originaban como resultado valores superiores al total de P , lo cual no es razonable, debido a que no es posible que se genere mayores abstracciones iniciales respecto a la precipitación. Se observó que estos valores dependen del NC, y el aumento de la cobertura del suelo con texturas edáficas del tipo arenoso-franco lo permiten teóricamente, disminuyendo el NC y generando una mayor abstracción. Esta singularidad, en el caso de $P = 80,1$ mm, se presenta en valores de NC iguales o inferiores a 40, que muestran anomalías entre el valor de I_0 respecto a P , originando que los parámetros Q y F , que también dependen de I_0 en su cálculo, generen inconsistencias. Por tal razón, el modelo GeoQ, al detectar que $I_0 > P$, para un determinado NC, le asigna un coeficiente del 100% a I_0 y 0 a los otros parámetros (Q y F), significando que para esos complejos suelo-vegetación hay una mayor absorción o abstracción de la precipitación en la superficie y no genera escorrentía.

La interpretación de estos resultados para cada coeficiente, en la aplicación del modelo GeoQ para la P propuesta, se expresa en la Figura C. 8, donde se visualiza el cambio de respuesta según NC.

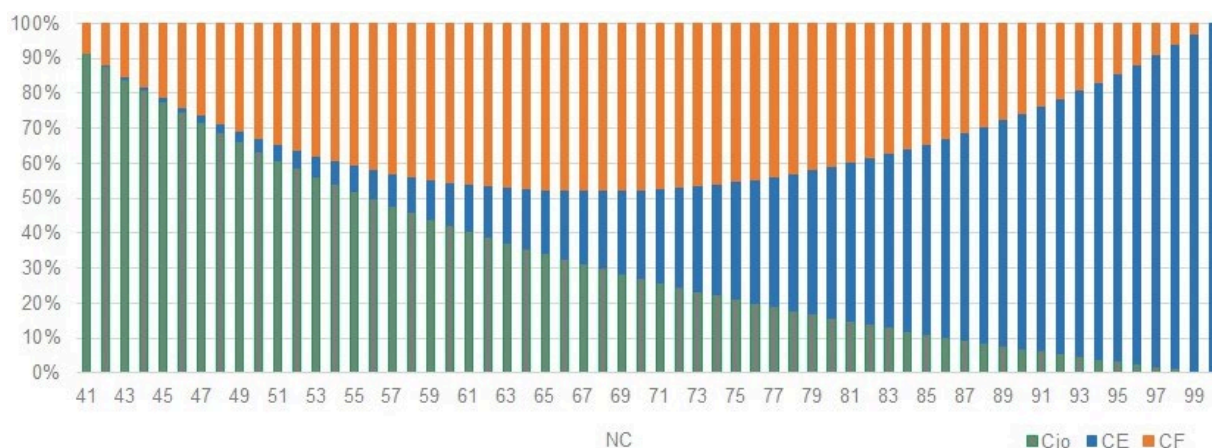


Figura C. 8. Representación de CE, CF, Cio en los NC de estudio para una tormenta de 80,1 mm. Fuente: Montealegre Medina y Gaspari (2021).

Diferentes autores (Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004; Henríquez *et al.*, 2006) resaltan que el uso de nuevas herramientas de análisis espacial para la evaluación ambiental de los procesos de desarrollo territorial, a través de la aplicación de modelos de simulación espacial para evaluar y simular el cambio en los valores del coeficiente de escorrentía superficial, es una interesante perspectiva de investigación y una aproximación metodológica útil para el entendimientos del comportamiento de variables hidrológicas, lo que mejora considerablemente la gestión y el análisis de la información espacial.

El modelo GeoQ, con aplicación del método del NC es una herramienta útil para el cálculo de la escorrentía a nivel geoespacial, a partir de datos de suelo y vegetación y/o uso del suelo que, generalmente, son de fácil disponibilidad. Como mencionó Rodríguez Vagaría *et al.* (2012) debido a su base, GeoQ en la herramienta Idrisi, se puede utilizar para gestionar y manejar cuencas hidrográficas y proyectos ambientales, sociales e hidrológicos; para estimar descargas, y para predecir la respuesta según se asocie a posibles cambios.

El análisis espacial de la cobertura y uso del suelo permiten evaluar las variaciones de la escorrentía al interior de una cuenca hidrográfica. Resultados encontrados por de Antueno *et al.* (2020) exponen que esta interacción permite proyectar y pronosticar la influencia sobre la escorrentía superficial según el uso del suelo a nivel geoespacial. Encontrando también que, dependiendo de la topografía de la zona de estudio, es posible determinar un volumen mayor de escorrentía en áreas serranas con presencia de tormentas extremas, mientras que en eventos modales de precipitación se registran mayores cantidades de escorrentía en zonas de lomadas. En el presente trabajo con GeoQ, se encontraron respuestas similares al comparar las 4 cuencas testigo, las cuales poseen características topográficas diferentes, identificando zonas planas y serranas predominantes en ellas, lo cual refleja la variación de precipitación escurrida en estas características topográficas.

La modelización de las variables hidrológicas tratadas en este estudio permitió aproximar una cuantificación de las mismas en una cuenca hidrográfica, según una precipitación establecida. Estos datos pueden ser utilizados para la planificación territorial como indicadores del recurso hídrico. Coincidiendo con Laterra *et al.* (2011), se propone como indicador de regulación hídrica, la proporción de agua de lluvia infiltrada frente a tormentas modales o con una recurrencia dada, a través del método de la curva-número del SCS. De igual forma Montico *et al.* (2019) enfatiza que los espacios verdes y su influencia no sólo en la infiltración y almacenamiento, sino también en la ralentización del

escurrimiento, mitiga los efectos de las precipitaciones intensas, aspecto que puede relacionarse con la gestión del riesgo hídrico. Las variables analizadas son de interés para realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos, ya que debería tener en cuenta el aprovechamiento conjunto o coordinado de las aguas superficiales y subterráneas (Montico *et al.*, 2019).

C.4. Conclusiones

La utilización de GeoQ permitió determinar, cuantificar y zonificar la esorrentía para una tormenta modal, según las CHA I, II y III sobre las cuencas testigo.

Es necesario estandarizar previamente la información de cobertura y tipo de suelos a la metodología del NC, por ello, se propone en este trabajo, una clasificación acorde a las características de las cuencas de estudio con base en tipologías existentes y en fuentes de datos oficiales para Argentina.

Se utiliza una lluvia modal para toda la superficie de las cuencas de estudio, basadas en datos oficiales del SMN, en estaciones cercanas a las mismas. Sin embargo, las características orográficas y zonales pueden hacer variar la cantidad de precipitación en cada una. No obstante, el análisis de la lluvia modal establecida genera un escenario adecuado para el análisis de la esorrentía superficial y el comportamiento variables hidrológicas.

La herramienta GeoQ permite una zonificación adecuada de los parámetros estudiados en el presente trabajo, estructurando y codificando los datos de entrada según la tipología del método de NC.

La sistematización de procesos geoespaciales del GeoQ, por medio de herramientas SIG, permitió agilizar y estandarizar procesos, al igual que manipular y analizar con información vectorial, generando una base de datos geoespacial que contienen información sobre la zonificación de los componentes hidrológicos, como I_0 , Q y F , contribuyendo a generar cartografía que describa este fenómeno. Además, conformaría material actualizado para apoyar proyectos de planificación territorial.

Además, esta herramienta se pretende divulgar para su uso a nivel de cuencas hidrográficas bajo el software libre QGIS, con el fin de que sea utilizada por la comunidad académica y de gestión de los recursos suelo-agua-vegetación, y la protección y conservación de recursos, su disponibilidad y gestión ambiental.

Actualmente, GeoQ está diseñada para evaluar la esorrentía con un único valor de precipitación para toda el área de una cuenca. Sin embargo, el grupo de investigación está trabajando en actualizaciones, para capturar datos de precipitación de forma heterogénea por medio de imágenes satelitales. Por ello, para futuros estudios se generará una nueva versión de GeoQ para la modelización hidrológica, a partir de productos de sensores remotos satelitales, como los son imágenes de precipitación, que brindará una mayor aproximación y distribución del fenómeno de lluvia-esorrentía en una cuenca hidrográfica, y Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) para establecer la influencia de la pendiente a partir de datos con valores de cota.

La herramienta GeoQ actual se encuentra a disposición del público en general / usuarios SIG, en el repositorio GitHub <https://github.com/fabalmon/GeoQ.git> en donde se almacena el código del complemento, junto con la documentación necesaria para su instalación y funcionamiento, lo cual incluye un manual para este propósito. Este repositorio está abierto para realizar comentarios y sugerencias sobre la construcción del código y a su desarrollo, planteado en este trabajo.

C.5. Bibliografía

- Aguayo, M. I., Wiegand, T., Azócar, G. D., Wiegand, K., & Vega, C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: A case study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*, 12(1), Artículo 13. <https://doi.org/10.5751/ES-01970-120113>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- de Antueno, L., Gaspari, F. J., & Guzmán Guaraca, A. (2020). Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*, 8(1), 20–42. <https://doi.org/10.47069/ESTUDIOS-AMBIENTALES.V8I1.659>
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes guide to GIS and image processing*. Clark University.
- Gaspari, F. J., & Senisterra, G. E. (2006). Zonificación del número de la curva (CN) en la Cuenca del Arroyo Pillahuincó Grande, Coronel Pringles. En *Tercer Congreso de la Ciencia Cartográfica*, Buenos Aires, Argentina.
- Gaspari, F. J. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (SIG)* [Tesis de maestría, Universidad Internacional de Andalucía]. <https://dspace.unia.es/handle/10334/59>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2010). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>
- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., Delgado, M. I., & Senisterra, G. E. (2015). Evaluación del servicio ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 114(1), 214–221. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/13036>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., & Montealegre Medina, F. A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas: Herramientas de sistemas de información geográfica*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87641>
- Gaspari, F. J., Díaz Gómez, A. R., & Montealegre Medina, F. A. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(1), 74–112. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7708827>
- Henríquez, C., Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: Aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), 61–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. (2009). *Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir de sensores remotos. Proyecto Específico (PNECO1643). Informe Técnico Unificado (Anexo II). Descripción de las categorías de Cobertura u Ocupación del Suelo de la República Argentina de acuerdo con el Sistema "Land Cover Classification System – FAO"*.

https://www.researchgate.net/publication/278962502_Monitoreo_de_la_Cobertura_y_el_Uso_del_Suelo_a_partir_de_sensores_remotos

Kent, K. M. (1968). *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds* (Technical Paper SCS-TP-149). U.S. Soil Conservation Service.

Kent, K. M. (1973). *A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds* (Rev. ed., Technical Paper SCS-TP-149). U.S. Soil Conservation Service.

Lattera, P., Castellarini, F., & Orúe, M. E. (2011). ECOSER: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. En *Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (pp. 359–389). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA].

López Cadena de Llano, F. (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. TRAGSA, TRAGSATEC, Mundi-Prensa.

https://infocarne.com/libro/restauracion_hidrologico_forestal_de_cuencas_y_control_de_la_erosion.htm

Marek, M. A. (2011). *Hydraulic design manual*. Texas Department of Transportation (TxDOT), Design Division.

Mintegui Aguirre, J. A., & López Unzué, F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>

Mockus, V. (1972). Section 4: Hidrology. En Soil Conservation Service (Ed.), *National engineering handbook* (p. 127). U.S. Department of Agriculture.

Montico, A., Zapperi, P. A., Zilio, M. I., & Gil, V. (2019). Identificación de servicios ecosistémicos urbanos en la ciudad de Bahía Blanca y su aplicación al análisis de la seguridad hídrica. *Revista Estudios Ambientales*, 7(1), 56–78. <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-ambientales/article/view/415>

Neilsen, R. D., & Hjelmfelt, A. T. (1998). Hydrologic soil group assignment. En S. R. Abt (Ed.), *Proceedings of the 1998 International Water Resources Engineering Conference* (pp. 1297–1302). American Society of Civil Engineers.

Rango, A. (1985). Assessment of remote sensing input to hydrologic models. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 21(3), 423–432.

Rodríguez Vagaría, A. M., & Gaspari, F. J. (2010). Herramienta para la determinación del número de curva y escurrimiento bajo entorno SIG. Idrisi Andes®. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (10), 11–26. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/203>

Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F. J., & Kruse, E. E. (2014). Simulación espacio-temporal del escurrimiento por la interacción entre los cambios del uso del suelo y evolución pluvial. *Revista de Tecnología. Journal of Technology*, 13, 38–48. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/118497>

- Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Evaluación del efecto de la restauración agro-hidrológica mediante la aplicación del modelo hidrológico GeoQ. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38(2), 171–181.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1669-23142012000200012&script=sci_arttext
- Sandoval, V., & Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, (11), 9–21.
- Shi, P.-J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J.-A., Ge, Y., & Qiu, G.-Y. (2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69(1), 31–35.
- Triviño Pérez, A., & Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, (35), 67. <https://doi.org/10.14198/INGEO2004.35.08>
- Volante, J. N. (Coord.). (2009). *Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir de sensores remotos. Proyecto Específico PNECO1643, Resultados 2006-2009 (Informe Técnico Unificado)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA].
https://www.researchgate.net/publication/278962502_Monitoreo_de_la_Cobertura_y_el_Uso_del_Suelo_a_partir_de_sensores_remotos
- Zhan, X., & Huang, M.-L. (2004). ArcCN-Runoff: An ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software*, 19(10), 875–879.

D. Anexo Capítulo 9. CASO DE ESTUDIO COMPLEMENTARIO.

Zonificación de la susceptibilidad a la inundación del noroeste bonaerense ²¹.

D.1. Introducción

El río Salado se encuentra en la Pampa húmeda bonaerense, específicamente en la Pampa Deprimida. Es una región de llanuras, de relieve muy suave, casi horizontal, con una pendiente media de aproximadamente 0,25 por mil, y decrece en altura con dirección oeste-este, en dirección a la costa del Mar Argentino. Definir la cuenca del río Salado resulta complejo, debido a que las aguas de los ríos y arroyos de cauce permanente escurren lentamente en direcciones variables hacia lagunas, bañados o sectores con menor nivel. El paisaje general es producto de la acción de agregación fluvial, modificada parcialmente por la acción del litoral y los vientos. Los suelos presentan un importante grado de desarrollo producto de la baja morfogénesis, el alto nivel del mar de los últimos períodos que ha implicado el predominio de la deposición frente a la erosión y a las condiciones bioclimáticas y morfogenéticas. Se presentan amplias terrazas fluviales y planicies aluviales surcadas por numerosos cursos de agua y frecuentes bajos y lagunas de poca profundidad.

La capacidad productiva de los suelos de la cuenca del río Salado permitió que los pastizales pampeanos se sustituyeran por agroecosistemas, evidenciando un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación. La actividad productiva es predominantemente agropecuaria; los recursos naturales directamente vinculados con esta producción que resultaron más afectados fueron los suelos y el agua. En la cuenca del río Salado predominan los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) sobre el escurrimiento superficial, razón por la cual las inundaciones son frecuentes, periódicas y prolongadas. Esto se agravó en las últimas tres décadas, al iniciarse un período más húmedo con mayor frecuencia de los eventos que afectan en forma generalizada la región (MOSP, 1999).

La susceptibilidad es entendida como la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra. En otras palabras, la susceptibilidad es la probabilidad de ocurrencia de un evento sobre un área en base a las condiciones locales del territorio, en este caso se trata de la susceptibilidad a la inundación y deslizamiento de taludes que pueda ocurrir en una determinada zona o región. Se entiende por inundación a aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y que ocasionan daños a la población, a sus actividades e infraestructura.

El objetivo fue caracterizar la susceptibilidad a la inundación en el noroeste bonaerense. Para ello se definió como cuenca representativa, a la A1 del río Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

²¹ Publicado en: Montealegre Medina F.A., Mazzucchelli M.G. & F.J. Gaspari F.J. (2017). Zonificación de la susceptibilidad a la inundación del noroeste bonaerense. E-ICES 12. 12° Encuentro Internacional Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional de Cuyo. 14 al 17 de noviembre de 2017. Mendoza. Argentina. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/148873>

D.2. Metodología

Según la descripción antecedente del ambiente, se realizó en la cuenca en estudio el análisis de la cobertura (bio) física observada en la superficie de la tierra, definida según FAO como cobertura de suelo (LCCS) de FAO (Jansen & Di Gregorio, 2000). El concepto se refiere a la descripción de la vegetación y elementos antrópicos presentes y lo diferencia del concepto de uso de la tierra, que está caracterizado por los arreglos, actividades e insumos que el hombre realiza en un determinado tipo de cobertura terrestre para producir, cambiar o mantenerla (FAO 2005). Estos datos se reagruparon en cinco clases y procesaron con herramientas SIG generalizando la tipología de la información geográfica contenida, y se reagruparon en zonas con características similares, interpretándolas mediante geoprocesamiento de superposición espacial de la información definida.

Además, se zonificaron los factores edáficos como ser las principales limitantes, descriptos como propiedades y características edáficas que influyen en el desarrollo de los cultivos, que resultan de los procesos de degradación del suelo por influencia antropogénica. Las limitantes edáficas superficiales detectadas en el área de estudio fueron reagrupadas en cinco clases y vectorizadas a partir del mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000 del INTA (SAGyP-INTA, 1989).

El geoprocesamiento de ambos mapas vectoriales definió categorías susceptibilidad a la inundación, en función de las características e incidencias de las capas que intervienen en su formación, definiendo áreas propensas a la inundación, categorizadas en alto, medio, bajo o nulo-indefinido. Para realizar los mapas de susceptibilidad a inundaciones se utilizó el Análisis Multicriterio (AMC) combinado con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). En este caso se calificaron los atributos que pueden favorecer o desfavorecer la susceptibilidad de inundación.

La identificación de susceptibilidades es una base de datos geoespacial de utilidad significativa en proyectos de planificación y establecimiento de políticas de gestión en cuencas hidrográficas. Al identificar las zonas susceptibles de inundación, es posible establecer políticas y acciones orientadas a evitar riesgos para los asentamientos humanos ubicados cerca o dentro de estas áreas, mediante estrategias como la reubicación o la restricción de construcciones (Tehrany *et al.*, 2015).

D.3. Resultados y discusión

Los resultados del análisis multicriterio aplicado a la cuenca A1 del río Salado permitieron caracterizar la susceptibilidad a la inundación mediante la integración de dos capas de información fundamentales: la cobertura de tierra según la clasificación LCCS de FAO y las limitantes principales del suelo. Este enfoque metodológico, basado en la combinación de análisis multicriterio con herramientas SIG, ha demostrado ser efectivo para la evaluación de amenazas por inundación en regiones con datos primarios escasos, como señalan Fernández y Lutz (2010) en su estudio de zonificación de peligro de inundación urbana en Tucumán.

A continuación, se describen los hallazgos para cada componente analizado y su síntesis se representa en el mapa de susceptibilidad resultante.

La aplicación de los conceptos formulados por el sistema de Clasificación de Cobertura de la Tierra de FAO (2005), permitió identificar cinco categorías de cobertura vegetal en el área de estudio, se representan en la Figura D. 1, que responden a las siguientes características:

- Cultivo (de herbáceas): Es una mezcla de distintas formas de vida (Graminoides y No Graminoides), que forman una capa continua de los dos elementos. Si la cobertura herbácea presenta graminoides en más de un 75 % se define como vegetación Graminoide. Lo mismo sucede para el caso no graminoides. En síntesis, el 81,21 % de la cuenca A1 se encuentra cultivada por formas de vida graminoides y no graminoides.
- Pasturas / herbáceas: En esta cobertura se homologaron las graminiformes que se presentan en comunidades con coberturas cerradas únicas (>65%) o combinadas con otras formas de vida. o cuando conforman comunidades con coberturas abiertas (del 65-15%), únicas o combinadas con otras formas de vida. Los árboles y/o arbustos pueden estar presentes con cobertura dispersa, es decir inferior al 15%. En la A1 ocupa el 2,75% de la superficie.
- Cuerpos de agua: Esta cobertura se refiere a las áreas cubiertas por agua, debido a la construcción de reservorios, canales, lagos artificiales, etc., De no haberse realizado estas construcciones, el área no debería estar cubierta por agua. Así y de acuerdo con la permanencia del agua en los sitios, los cuerpos de agua se pueden dividir en permanentes (cuando la duración es mayor a 9 meses), y no permanentes (cuando es menor a 9 meses). Ocupa el 4,26% de la cuenca.
- Áreas urbanas: Son aquellas áreas con cobertura artificial como resultado de actividades humanas: construcciones, extracción o depósitos. La clasificación de las coberturas depende del aspecto superficial, en él se especifica si las superficies son construidas o no construidas. Las superficies construidas se caracterizan por la sustitución de la cobertura original con una cobertura artificial, frecuentemente impermeable. Estas ocupan solo el 0,3% de la cuenca.
- Bañados (herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas / anegadas): Está representada por los pastizales en comunidades de cobertura abierta o cerrada, únicas o combinadas con otras formas de vida. Puede haber presencia de árboles y/o arbustos La característica en particular de esta cobertura es que se encuentra en áreas (semi) permanentemente inundadas o anegadas, por más de 4 meses al año, periodo de tiempo, que no necesariamente está ligado a una estación climática. Están representadas en el 11,47% de la A1.

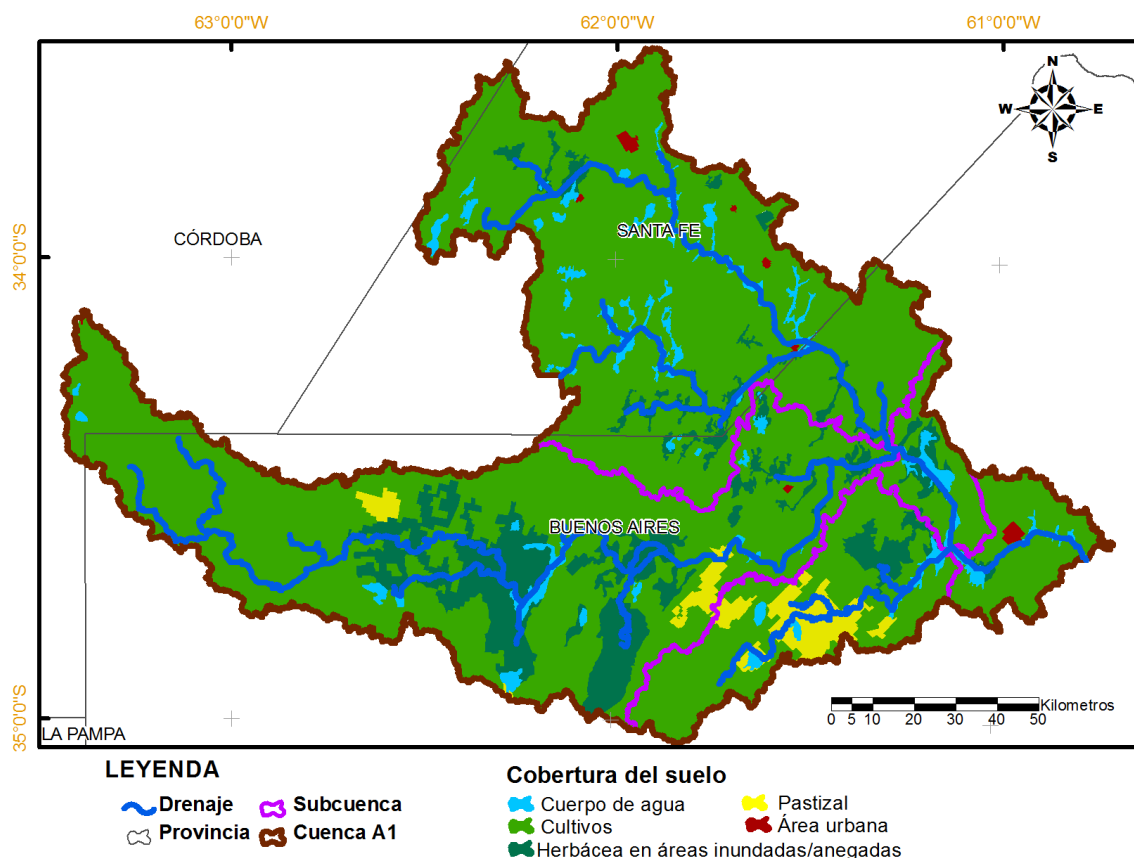


Figura D. 1. Coberturas de Tierra según clasificación LCCS. FAO 2005. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).

Los resultados alcanzados reflejan una intensa actividad agrícola característica de la región pampeana. Esta dominancia de cultivos anuales tiene implicancias directas en la dinámica hidrológica regional. Viglizzo *et al.* (2001) documentaron que la transformación de los pastizales pampeanos originales hacia agroecosistemas ha generado importantes alteraciones en el funcionamiento hidrológico del paisaje. Más recientemente, Houspanossian *et al.* (2023) demostraron que el reemplazo de vegetación nativa y pasturas por cultivos de raíces someras ha elevado significativamente los niveles freáticos en la llanura chaco-pampeana, aumentando la susceptibilidad a inundaciones en áreas donde anteriormente no se registraban estos eventos.

Los bañados, caracterizados como herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas o anegadas, constituyen el 11,47% de la cuenca. Estas zonas presentan anegamiento semipermanente por más de cuatro meses al año, condición que no necesariamente está ligada a una estación climática específica, sino a las características geomorfológicas locales y la dinámica freática. La presencia de estos ambientes coincide espacialmente con las áreas de menor pendiente y drenaje deficiente, particularmente en las subcuencas 1 y 2. Bohn *et al.* (2016) describieron que las lagunas y bañados pampeanos son particularmente sensibles a las fluctuaciones climáticas debido a su escasa profundidad, gran superficie relativa y alta relación superficie/volumen, lo cual explica su expansión y contracción en función de la variabilidad pluviométrica interanual.

Los cuerpos de agua permanentes y temporales ocupan el 4,26% de la superficie, distribuidos principalmente a lo largo de la red de drenaje y en depresiones topográficas. Esta proporción es consistente con la caracterización realizada por el Plan Maestro del Río Salado (MOSP, 1999), que

identifica numerosas lagunas de poca profundidad como rasgo distintivo del paisaje. Kruse y Ainchil (2017) señalaron que estos cuerpos de agua se distribuyen de forma dispersa en la cuenca, reflejando la geomorfología de la pampa deprimida caracterizada por depresiones aisladas sin conexión permanente con la red de drenaje. Las pasturas y herbáceas representan el 2,75% del área, concentradas en sectores con limitaciones para la agricultura intensiva. Finalmente, las áreas urbanas ocupan apenas el 0,3% de la cuenca, distribuidas en los centros poblados de la región.

El análisis de las limitantes principales del suelo, derivado de la cartografía del SAGyP-INTA (1989) a escala 1:500.000, reveló una distribución espacial diferenciada de las restricciones edáficas que condicionan la susceptibilidad a la inundación, representados en la Figura D. 2 y descritos a continuación.

- Áreas sin limitaciones: son tierras que no presentan limitaciones actuales para su uso de las cuales el 77% se encuentran distribuidos en suelos productivos del sur de la provincia de Santa Fe y NO de Buenos Aires. Son áreas susceptibles a erosión eólica y pueden presentar alcalinidad en profundidad.
- Drenaje deficiente: implica la saturación del suelo en condiciones tales que el exceso de agua no permite más infiltración, también se considera un drenaje deficiente cuando se reduce la capacidad de infiltración debido a la compactación del suelo o la presencia de capas poco permeables. En suelos con drenaje deficiente, el agua de lluvia infiltra con lentitud, lo que hace que el suelo permanezca con excesiva humedad durante períodos cortos, impidiendo una buena absorción de nutrientes y favoreciendo el desarrollo de enfermedades fúngicas y bacterianas. Ocupa el 17,4% de la cuenca.
- Susceptibilidad a inundación o anegamiento: cómo surge de la Figura D. 2, el 10% de la superficie total de la cuenca se zonificó con esta limitante, particularmente en las subcuencas 2 y 1 donde se zonificaron en el 6,6 % y 3,4 %, respectivamente.
- Baja retención de humedad: en líneas generales esta limitante no reviste relevancia en la cuenca. Está relacionada a las subcuencas 1 y 2 con el 4% de ocupación, en las zonas cercanas a la provincia de Córdoba.
- No apto agricultura: 180 km² que representan el 1 % de la totalidad del área de estudio se zonificaron como no aptas para las actividades agrícolas, distribuidas en las cinco subcuencas.

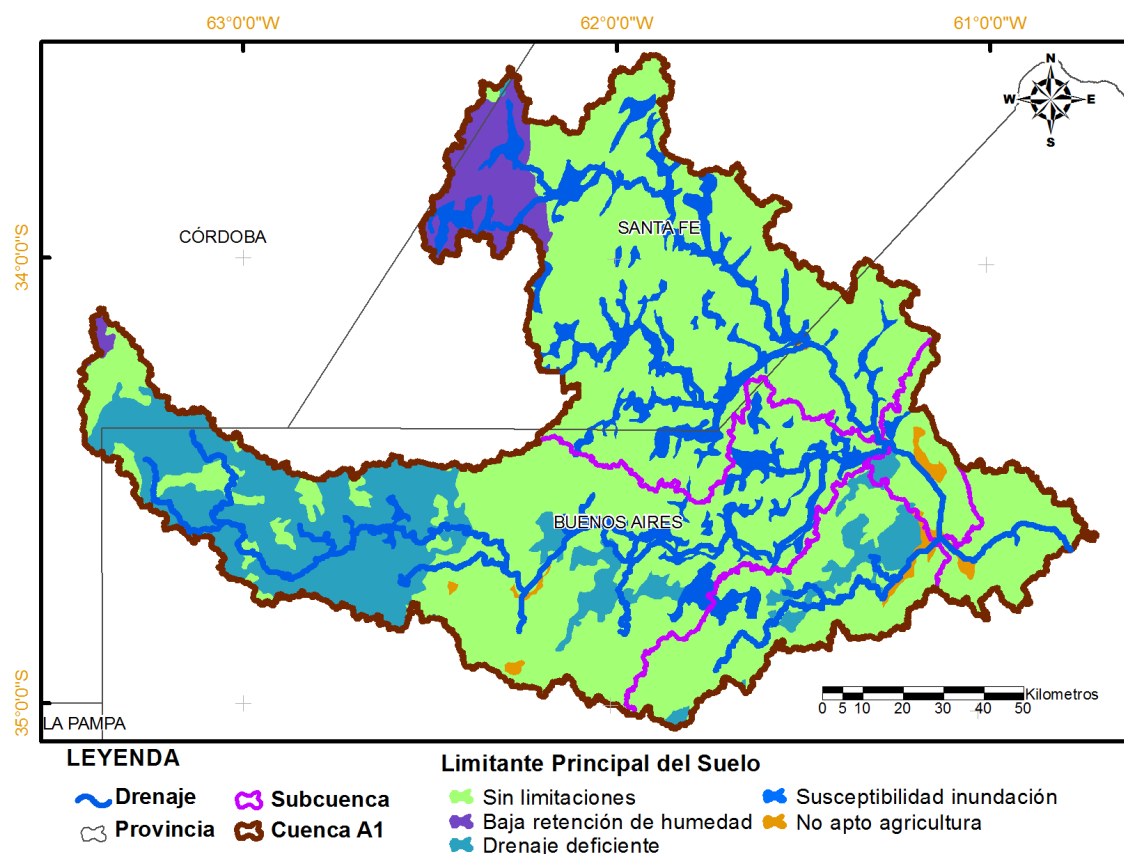


Figura D. 2. Limitantes principales presentes en el área de estudio. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).

Las áreas sin limitaciones hídrico-edáficas constituyen la mayor proporción del territorio, coincidiendo con los suelos más productivos de la región. Estas tierras, aunque aptas para el uso agrícola, no están exentas de riesgo ante eventos extremos de precipitación, especialmente considerando las modificaciones en el balance hídrico regional documentadas en las últimas décadas.

El drenaje deficiente representa el 17,4% de la superficie de la cuenca y constituye la limitante más significativa para la susceptibilidad hídrica. Esta condición implica que el exceso de agua no permite una adecuada infiltración, ya sea por saturación del perfil edáfico o por la presencia de capas poco permeables que reducen la percolación. Aragón *et al.* (2011) describieron que en las planicies sedimentarias de la pampa occidental predominan los procesos de transferencia vertical (evaporación-infiltración) sobre el escurrimiento superficial, razón por la cual las inundaciones tienden a ser prolongadas una vez que se supera la capacidad de almacenamiento del suelo.

La susceptibilidad a inundación o anegamiento como limitante edáfica específica abarca el 10% de la cuenca, concentrándose particularmente en las subcuencas 1y 2, donde representa el 6,6% y 3,4% respectivamente. Esta zonificación coincide con las áreas de menor cota topográfica y proximidad a los cursos de drenaje principales. Quiroz Londoño *et al.* (2013) desarrollaron modelos de anegamiento para el sudeste bonaerense que identificaron patrones espaciales similares, donde las áreas de mayor susceptibilidad se asocian consistentemente con posiciones topográficas deprimidas y suelos con restricciones de drenaje.

La baja retención de humedad afecta aproximadamente el 4% de la superficie, principalmente en sectores cercanos a la provincia de Córdoba, caracterizados por texturas más gruesas. Las áreas no

aptas para agricultura representan apenas el 1% del territorio (180 km²), distribuidas en las cinco subcuencas.

Para integrar y procesar los mapas descritos en el AMC, se definió una matriz de cruce entre las categorías de cobertura de tierra y las limitantes principales que permitió establecer los niveles de susceptibilidad a la inundación para cada combinación de variables (Tabla D. 1).

Tabla D. 1. Cruce de rangos de susceptibilidad para la cobertura de la tierra y los limitantes principales.

		Cobertura de tierra				
		Area urbana	Cuerpos de agua	Cultivos	Herbáceas en áreas inundadas	Pastizal
Limitante principal	Baja retención humedad	Nulo	Alto	Bajo	Bajo	
	Drenaje deficiente		Alto	Medio	Alto	Bajo
	No apto agricultura		Alto	Alto	Alto	Medio
	Sin limitantes hídricos	Nulo	Alto	Bajo	Medio	Nulo
	Susceptibilidad inundación	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

La elección de estos factores condicionantes respondió a las particularidades de los ambientes de llanura pampeana, donde la escasa pendiente y la predominancia de procesos de transferencia vertical sobre los horizontales condicionan la respuesta hidrológica del sistema, como lo indican Kazakis *et al.* (2015) y Vojtek & Vojteková (2019). Fernández y Lutz (2010) demostraron que este tipo de enfoque multicriterio permite obtener zonificaciones confiables utilizando variables disponibles en cartografía base, lo cual es particularmente relevante para extensas áreas de llanura donde los datos hidrométricos detallados son escasos.

La categoría de susceptibilidad a inundación como limitante principal generó niveles altos de susceptibilidad independientemente del tipo de cobertura, evidenciando que esta condición edáfica es el factor más determinante en la predisposición al anegamiento. Este hallazgo es coherente con lo reportado por Borzi *et al.* (2021) en la cuenca del río Samborombón, donde identificaron que las áreas con mayor amenaza de inundación se corresponden principalmente con las planicies de inundación y depresiones topográficas que carecen de una red de drenaje integrada. Los cuerpos de agua también presentan susceptibilidad alta en todas las combinaciones, dado que su presencia indica zonas de acumulación hídrica permanente o semipermanente donde cualquier incremento en los aportes pluviales resulta en expansión del área anegada.

El drenaje deficiente genera susceptibilidad alta cuando se combina con cuerpos de agua o herbáceas en áreas inundadas, nivel medio con cultivos, y bajo con pastizales. Esta gradación refleja la interacción entre las condiciones edáficas de escasa permeabilidad y la capacidad de la cobertura vegetal para modular la respuesta hidrológica. Kourgialas y Karatzas (2011) destacaron que la elevación y la distancia a los cursos de agua constituyen los parámetros de mayor influencia en la determinación de áreas susceptibles a inundación, pero en cuencas de llanura con pendientes extremadamente bajas como la A1, donde predominan los procesos de anegamiento por saturación sobre el desbordamiento de cauces definidos, como lo expresado por Aragón *et al.* (2011), donde las características edáficas adquieren una relevancia comparativamente mayor.

Las combinaciones que resultan en susceptibilidad nula o indefinida corresponden principalmente a áreas urbanas con suelos de baja retención de humedad o sin limitantes hídricos. Esta clasificación parte del supuesto de que las áreas urbanizadas cuentan con infraestructura de drenaje adecuada, aunque esta condición debería verificarse caso por caso en estudios de mayor detalle. Bathrellos *et al.* (2016) enfatizaron la importancia de considerar el desarrollo urbano como factor modificador de la susceptibilidad, dado que la impermeabilización de superficies puede tanto incrementar la generación de escorrentía como reducir la vulnerabilidad local si existe infraestructura de drenaje apropiada.

La integración geoespacial de las capas de cobertura de tierra y limitantes principales mediante el análisis multicriterio generó el mapa de susceptibilidad a la inundación de la cuenca A1 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los resultados indican que el 62,1% de la superficie presenta susceptibilidad baja, el 21,3% susceptibilidad media, el 16,3% susceptibilidad alta, y apenas el 0,3% corresponde a categoría nula o indefinida. Esta distribución proporcional es consistente con las características geomorfológicas de la llanura pampeana descritas por el Plan Maestro del Río Salado (MOSP, 1999), donde predominan los procesos de transferencia vertical sobre el escurrimiento superficial concentrado.

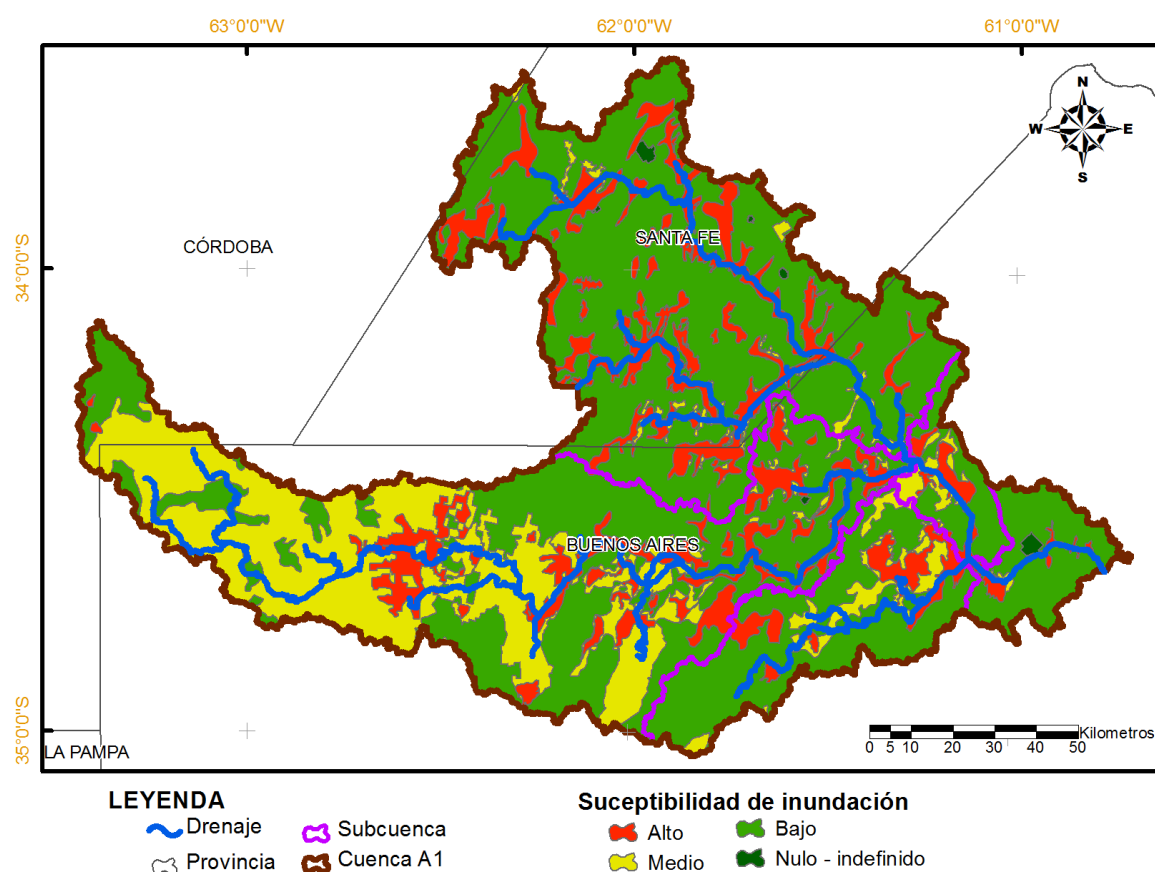


Figura D. 3. Mapa de rangos de susceptibilidad de inundación de la cuenca A1. Fuente: Adaptado de Montealegre Medina et al. (2017).

La distribución espacial de la susceptibilidad alta muestra un patrón claramente asociado a las vías de escurrimiento y zonas deprimidas del terreno. Las áreas más susceptibles se localizan a lo largo de los principales cursos de drenaje y en las proximidades de los cuerpos de agua, donde confluyen las

condiciones de drenaje deficiente y coberturas asociadas a ambientes húmedos. Este patrón espacial concuerda con los hallazgos de Borzi *et al.* (2021), quienes identificaron que las áreas con mayor amenaza de inundación en la cuenca del Samborombón se corresponden principalmente con las planicies de inundación de ríos y tributarios, así como con depresiones topográficas que carecen de una red de drenaje integrada. De manera similar, el análisis de ocurrencia de agua superficial mediante productos GSWE (Pekel *et al.*, 2016) desarrollado en capítulos anteriores de esta tesis evidenció que las áreas con mayor frecuencia de presencia de agua coinciden con las zonas aquí clasificadas como de susceptibilidad alta.

La susceptibilidad media se distribuye en una franja de transición entre las áreas de drenaje deficiente y las zonas sin limitantes hídricas, funcionando como un área de amortiguación donde la probabilidad de anegamiento depende más fuertemente de la magnitud y duración de los eventos de precipitación. Scarpati y Capriolo (2018) documentaron que la alternancia de períodos húmedos y secos en la región pampeana genera ciclos recurrentes de inundación y sequía, por lo cual las áreas de susceptibilidad media representan zonas de incertidumbre donde las condiciones pueden variar significativamente entre años. Estas zonas coinciden parcialmente con áreas de uso agrícola intensivo, lo cual tiene implicancias para la productividad agropecuaria regional y la planificación de actividades.

La predominancia de susceptibilidad baja (62,1%) no debe interpretarse como ausencia de riesgo, sino como una menor probabilidad relativa de anegamiento bajo condiciones pluviométricas normales. Houspanossian *et al.* (2023) advirtieron que las áreas inundables en la llanura chaco-pampeana se están expandiendo a una tasa aproximada de 700 km² por año, fenómeno no observado en otras regiones del continente. Este proceso implica que áreas actualmente clasificadas con susceptibilidad baja o media podrían incrementar su vulnerabilidad en el futuro si continúan las tendencias de cambio de uso del suelo y modificación del balance hídrico regional.

El análisis desagregado por subcuencas (Tabla D. 2) permite identificar diferencias significativas en la distribución espacial de la susceptibilidad a inundación.

Tabla D. 2. Áreas susceptibles de inundación por subcuencas.

Rango de susceptibilidad	Ocupación en superficie por subcuenca (%)				
	Subcuenca				
	1	2	3	4	5
Alto	6,07	7,67	0,66	1,57	0,36
Bajo	18,59	29,29	2,13	8,13	3,98
Medio	18,06	1,04	0,59	1,55	0,05
Nulo	0,02	0,14			0,10

A partir de los resultados generales observados en la cuenca A1 y, desglosándolos a nivel subcuenca se puede observar que las subcuencas 1 y 2 concentran la mayor proporción de áreas con susceptibilidad alta y media, sumando conjuntamente el 13,74% del área total con susceptibilidad alta (6,07% y 7,67% respectivamente) y el 19,10% con susceptibilidad media. Este patrón se explica por la convergencia de factores desfavorables: menor pendiente topográfica, mayor proporción de suelos con drenaje deficiente, y proximidad a los sectores de descarga de la cuenca. Senisterra *et al.* (2015) señalaron que la posición del terreno constituye un factor determinante en la zonificación de

vulnerabilidad ambiental en cuencas de la región, dado que las áreas topográficamente deprimidas concentran los flujos hídricos superficiales y subsuperficiales.

La subcuenca 2 presenta la mayor extensión de áreas con susceptibilidad baja (29,29%), reflejando la predominancia de suelos sin limitantes hídricas significativas en gran parte de su territorio. Sin embargo, también concentra el 7,67% de las áreas de susceptibilidad alta, evidenciando una marcada heterogeneidad espacial en las condiciones de drenaje. Esta dualidad es característica de las cuencas de llanura pampeana, donde pequeñas variaciones microtopográficas generan diferencias sustanciales en el comportamiento hidrológico local. Kruse y Ainchil (2017) describieron este fenómeno como una consecuencia de la geomorfología de la pampa deprimida, donde depresiones aisladas de diverso tamaño alternan con áreas de mejor drenaje relativo sin un patrón espacial definido a escala regional.

Las subcuencas 3, 4 y 5, localizadas en sectores de cabecera o áreas con mejor desarrollo de la red de drenaje, presentan proporciones menores de susceptibilidad alta (0,66%, 1,57% y 0,36% respectivamente). La subcuenca 3 muestra los valores más bajos en todas las categorías de susceptibilidad, sugiriendo condiciones edáficas e hidrológicas más favorables para el escurrimiento y menor acumulación superficial. Este gradiente de susceptibilidad desde las subcuencas de cabecera hacia las de descarga es coherente con el modelo conceptual de funcionamiento hidrológico de las cuencas de llanura pampeana descrito por Aragón *et al.* (2011), donde los excedentes hídricos se acumulan progresivamente hacia los sectores topográficamente más bajos.

La categoría nula o indefinida aparece únicamente en las subcuencas 1, 2 y 5, asociada principalmente a las áreas urbanas con infraestructura de drenaje. La ausencia de esta categoría en las subcuencas 3 y 4 indica que la totalidad de sus superficies presenta algún grado de susceptibilidad al anegamiento, aunque predominantemente en niveles bajos. Hunter *et al.* (2007) destacaron la importancia de reconocer que incluso áreas con baja susceptibilidad pueden verse afectadas durante eventos extremos, por lo cual la clasificación debe interpretarse en términos probabilísticos más que determinísticos.

D.4. Conclusiones

El procesamiento mediante Sistemas de Información Geográfica permitió definir áreas susceptibles de inundación en forma geoespacial y de manera operativa, utilizando datos de libre acceso disponibles en repositorios institucionales y redes de información cartográfica. La metodología basada en el cruce de coberturas de tierra (LCCS-FAO) y limitantes edáficas principales demostró ser una aproximación válida para la caracterización inicial de la susceptibilidad en cuencas extensas de llanura, coherente con los enfoques metodológicos aplicados por Fernández y Lutz (2010) en Tucumán y Borzi *et al.* (2021) en la cuenca del Samborombón.

El 37,6% de la cuenca A1 presenta susceptibilidad media a alta de inundación, distribuyéndose de forma heterogénea entre las cinco subcuencas analizadas. Las áreas de susceptibilidad elevada se localizan predominantemente en zonas pertenecientes a las riberas de los cursos de drenaje, depresiones topográficas y sectores con drenaje deficiente, patrón espacial consistente con el conocimiento previo sobre la geomorfología e hidrología de la región pampeana (MOSP, 1999; Kruse & Ainchil, 2017). La susceptibilidad media caracteriza principalmente las zonas de amortiguación hídrica y áreas con actividades agropecuarias sobre suelos con limitantes moderadas, mientras que la

susceptibilidad baja predomina en sectores con mejor desarrollo del drenaje natural y suelos sin restricciones hídricas significativas.

Las subcuencas 1 y 2 concentran las mayores proporciones de superficie con susceptibilidad alta, sumando conjuntamente el 13,74% del área total de la cuenca en esta categoría. Este patrón responde a la convergencia de factores edáficos desfavorables, la posición topográfica deprimida y la proximidad a los sectores de descarga del sistema, en coincidencia con el modelo de funcionamiento hidrológico de las planicies pampeanas descrito por Aragón *et al.* (2011). La identificación de estas áreas prioritarias constituye información fundamental para la planificación territorial y la gestión del riesgo hídrico, permitiendo orientar recursos hacia los sectores de mayor vulnerabilidad.

Los cambios de uso del suelo documentados en la región pampeana durante las últimas décadas, particularmente la expansión de cultivos anuales sobre vegetación nativa y pasturas, han modificado la dinámica hidrológica regional elevando los niveles freáticos (Viglizzo *et al.*, 2001; Houspanossian *et al.*, 2023). Este proceso implica que la susceptibilidad real actual podría ser mayor que la derivada exclusivamente de las características edáficas históricas contenidas en la cartografía de suelos utilizada. La expansión de áreas inundables a una tasa de aproximadamente 700 km² anuales en la llanura central, documentada por Houspanossian *et al.* (2023), sugiere la necesidad de actualizar periódicamente las evaluaciones de susceptibilidad incorporando información sobre la evolución del uso del suelo y el comportamiento freático.

La zonificación de susceptibilidad a la inundación en la A1 constituye un insumo de utilidad para la priorización de áreas para estudios hidrológicos de mayor detalle, particularmente en las subcuencas 1 y 2, al igual que para la identificación de zonas donde restringir usos del suelo sensibles al anegamiento. Los resultados alcanzados contribuyen una base cartográfica para el diseño de sistemas de monitoreo y alerta temprana, considerando la memoria hidrológica del sistema documentada mediante productos GSWE, lo cual aporta información valiosa para la planificación de infraestructura vial y de servicios considerando el riesgo hídrico. La integración de estos resultados con los análisis de vulnerabilidad hidrológica desarrollados en otros capítulos de esta tesis permitiría avanzar hacia evaluaciones integrales del riesgo de inundación en la cuenca A1.

D.5. Bibliografía

Aragón, R., Jobbágy, E. G., & Viglizzo, E. F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), 433-447.

<https://doi.org/10.1002/eco.149>

Bathrellos, G. D., Karymbalis, E., Skilodimou, H. D., Gaki-Papanastassiou, K., & Baltas, E. A. (2016). Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), Artículo 319. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5157-1>

Bohn, V. Y., Delgado, A. L., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75, Artículo 818. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>

Borzi, G., Roig, A., Tanjal, C., Santucci, L., Tejada Tejada, M., & Carol, E. (2021). Flood hazard assessment in large plain basins with a scarce slope in the Pampean Plain, Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Artículo 177. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08988-1>

Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1–4), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2005). *Land cover classification system: Classification concepts and user manual. Software version 2* (Environment and Natural Resources Series No. 8). <https://www.fao.org/4/y7220e/y7220e00.htm>

Houspanossian, J., Giménez, R., Whitworth-Hulse, J. I., Noretto, M. D., Tych, W., Atkinson, P. M., Rufino, M. C., & Jobbágy, E. G. (2023). Agricultural expansion raises groundwater and increases flooding in the South American plains. *Science*, 380(6652), 1344–1348. <https://doi.org/10.1126/science.add5462>

Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., & Wilson, M. D. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Geomorphology*, 90(3–4), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.021>

Jansen, L., & Di Gregorio, A. (2000). *Land cover classification system (LCCS): Classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. https://www.researchgate.net/publication/229839605_Land_Cover_Classification_System_LCCS_Classification_Concepts_and_User_Manual

Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—A case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212–225. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>

Kruse, E., & Ainchil, J. (2017). Comportamiento hidrológico en grandes llanuras: Caso de estudio Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *AUGM DOMUS*, 9, 1–11. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/2482>

Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires [MOSP]. (1999). *Plan maestro integral de la cuenca del Río Salado*. Dirección Provincial de Hidráulica. https://www.gba.gob.ar/hidraulica/cuenca_salado1

Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Quiroz Londoño, O. M., Grondona, S. I., Massone, H. E., Farenga, M. O., Martínez, G. A., & Martínez, D. E. (2013). Modelo de anegamiento y estrategia de predicción-prevención del riesgo de inundación en áreas de llanura: El sudeste de la provincia de Buenos Aires como caso de estudio. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 13(1), 76-98.

<https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/262>

Scarpati, O. E., & Capriolo, A. D. (2018). Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 79(285), 375-395.

<https://doi.org/10.3989/estgeogr.201814>

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca & Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [SAGyP-INTA]. (1989). *Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires* (Escala 1:500.000) [Proyecto PNUD ARG/85/019]. <https://searchworks.stanford.edu/view/2116475>

Senisterra, G. E., Gaspari, F. J., & Delgado, M. I. (2015). Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*, 3(1), 38-58.

<https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v3i1.1047>

Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2015). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>

Viglizzo, E. F., Lértora, F. A., Pordomingo, A. J., Bernardos, J., Roberto, Z. E., & del Valle, H. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83(1), 65-81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00155-9)

Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water*, 11(2), Artículo 364. <https://doi.org/10.3390/w11020364>

E. Anexo Capítulo 9. Matrices de la metodología de AHP

En este anexo se presentan las matrices (en forma de tablas) y resultados de la metodología AHP por medio de la operación de las mismas, con los valores asignados a la ponderación tanto de los factores condicionantes como los descriptores pertenecientes a todos los factores considerado para la obtención de la definición de la vulnerabilidad hidrológica para la cuenca A1. En las tablas presentadas, los valores resaltados en gris representan los resultados obtenidos de las operaciones de las matrices planteadas.

Aclaración sobre los factores: al analizar un factor desencadenante y uno de evaluación, estos tienen un valor de 1 en la ponderación del proceso general, por lo cual estos no se consideran en el procedimiento de matrices para los factores.

E.1. Cálculo para los factores condicionantes

A continuación, se presentan las matrices pertenecientes a los factores condicionantes, los cuales hacen parte de la ponderación planteada para la sección de susceptibilidad, de la metodología para el cálculo de la vulnerabilidad hidrológica (Figura 9.1).

E.1.1. Matriz de comparación de pares

Tabla E. 1. Matriz de comparación de pares para los factores condicionantes.

	Posición del Terreno	Coefficiente de Esguerrimiento	Drenaje	Limitantes principales
Posición del Terreno	1,00	2,00	5,00	9,00
Coefficiente de Esguerrimiento	0,50	1,00	3,00	6,00
Drenaje	0,20	0,33	1,00	4,00
Limitantes principales	0,11	0,17	0,25	1,00
SUMA	1,81	3,50	9,25	20,00
1/SUMA	0,55	0,29	0,11	0,05

E.1.2. Matriz de normalización

Tabla E. 2. Matriz de normalización para los factores condicionantes.

F. Condicionantes	Posición del Terreno	Coefficiente de Esguerrimiento	Drenaje	Limitantes principales	Vector Priorización	Porcentaje (%)
Posición del Terreno	0,55	0,57	0,54	0,45	0,529	52,85
Coefficiente de Esguerrimiento	0,28	0,29	0,32	0,30	0,297	29,65
Drenaje	0,11	0,10	0,11	0,20	0,128	12,84
Limitantes principales	0,06	0,05	0,03	0,05	0,046	4,65

E.1.3. Cálculo del vector suma ponderada

Tabla E. 3. Vector suma ponderada para los factores condicionantes.

Resultados de la operación de matrices				Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,53	0,59	0,64	0,42	2,182	4,13
0,26	0,30	0,39	0,28	1,225	4,13
0,11	0,10	0,13	0,19	0,519	4,04
0,06	0,05	0,03	0,05	0,187	4,02

Utilizando el promedio de los valores del cociente entre el Vector Suma Ponderada y el Vector Priorización, el cual corresponde al valor máximo de autovalores de la matriz de comparación de pares inicial (λ_{max}), siendo este valor 4,079, se obtiene el IC considerando que el n para esta operación es igual a 4 (la cantidad de factores condicionantes), siendo su valor de 0,026. Con este resultado se calcula la RC, utilizando el IA_n con el n anterior, que, según la Tabla 9.5 corresponde a 0,882. De esta manera se obtiene el valor de 0,030, el cual se encuentra por debajo de 4% (0,04) argumentando de esta forma que la configuración y ponderación de los factores condicionantes propuesta es consistente para el análisis y cálculo de la vulnerabilidad hidrológica planteada.

E.2. Cálculo para los descriptores de los todos los factores

A continuación, se presenta el procesamiento y cálculos de las matrices pertenecientes a los descriptores de cada uno de los factores considerados, evaluando y sustentando la ponderación individual asignada al interior de cada factor en la metodología completa.

E.2.1. Matrices de comparación de pares

Tabla E. 4. Matriz de comparación de pares para el factor Posición del Terreno.

	Vía de Escurrimiento	Planicie Anegable	Planicie	Lomas altas y Terrazas	Loma
Vía de Escurrimiento	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
Planicie Anegable	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00
Planicie	0,20	0,33	1,00	4,00	6,00
Lomas Altas y Terrazas	0,14	0,20	0,25	1,00	3,00
Loma	0,11	0,14	0,17	0,33	1,00
Suma	1,79	4,68	9,42	17,33	26,00
1/Suma	0,56	0,21	0,11	0,06	0,04

Tabla E. 5. Matriz de comparación de pares para el factor Coeficiente de Escurrimiento.

	>80	70-80	60-70	50-60	<50
>80	1,00	2,00	3,00	5,00	7,00
70-80	0,50	1,00	2,00	4,00	6,00
60-70	0,33	0,50	1,00	2,00	5,00
50-60	0,20	0,25	0,50	1,00	4,00
<50	0,14	0,17	0,20	0,25	1,00
Suma	2,18	3,92	6,70	12,25	23,00
1/Suma	0,46	0,26	0,15	0,08	0,04

Tabla E. 6. Matriz de comparación de pares para el factor Drenaje.

	Pobre	Moderado	Imperfecto	Bien Drenado	Algo Excesivo
Pobre	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
Moderado	0,33	1,00	5,00	6,00	7,00
Imperfecto	0,20	0,20	1,00	3,00	5,00
Bien Drenado	0,14	0,17	0,33	1,00	3,00
Algo Excesivo	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00
Suma	1,79	4,51	11,53	17,33	25,00
1/Suma	0,56	0,22	0,09	0,06	0,04

Tabla E. 7. Matriz de comparación de pares para el factor Limitantes Principales.

	Drenaje Deficiente	Susceptibilidad Inundación	Susceptibilidad a Erosión Hídrica	Susceptibilidad a Erosión Eólica	Sin Limitaciones
Drenaje Deficiente	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
Susceptibilidad Inundación	0,33	1,00	3,00	5,00	7,00
Susceptibilidad a Erosión Hídrica	0,20	0,33	1,00	4,00	6,00
Susceptibilidad a Erosión Eólica	0,14	0,20	0,25	1,00	3,00
Sin Limitaciones	0,11	0,14	0,17	0,33	1,00
Suma	1,79	4,68	9,42	17,33	26,00
1/Suma	0,56	0,21	0,11	0,06	0,04

Tabla E. 8. Matriz de comparación de pares para el factor Intensidad de Cambio de Ocurrencia.

	Ganancia Máxima	Ganancia Mínima	Sin cambio	Perdida	No Agua
Ganancia Máxima	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
Ganancia Mínima	0,33	1,00	5,00	6,00	7,00
Sin cambio	0,20	0,20	1,00	3,00	5,00
Perdida	0,14	0,17	0,33	1,00	3,00
No Agua	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00
Suma	1,79	4,51	11,53	17,33	25,00
1/Suma	0,56	0,22	0,09	0,06	0,04

Tabla E. 9. Matriz de comparación de pares para el factor Ocurrencia.

	>80	60-80	40-60	20-40	<20
>80	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00
60-80	0,33	1,00	5,00	6,00	7,00
40-60	0,20	0,20	1,00	3,00	5,00
20-40	0,14	0,17	0,33	1,00	3,00
<20	0,11	0,14	0,20	0,33	1,00
Suma	1,79	4,51	11,53	17,33	25,00
1/Suma	0,56	0,22	0,09	0,06	0,04

E.2.2. Matrices de normalización

Tabla E. 10. Matriz de normalización para el factor Posición del Terreno.

	Vía de Esguerrimiento	Planicie Anegable	Planicie	Lomas altas y Terrazas	Loma	Vector Priorización	Porcentaje (%)
Vía de Esguerrimiento	0,56	0,64	0,53	0,40	0,35	0,496	49,64
Planicie Anegable	0,19	0,21	0,32	0,29	0,27	0,255	25,53
Planicie	0,11	0,07	0,11	0,23	0,23	0,150	15,02
Lomas Altas y Terrazas	0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,064	6,45
Loma	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,034	3,36

Tabla E. 11. Matriz de normalización para el factor Coeficiente de Esguerrimiento.

	>80	70-80	60-70	50-60	<50	Vector Priorización	Porcentaje (%)
>80	0,46	0,51	0,45	0,41	0,30	0,426	42,61
70-80	0,23	0,26	0,30	0,33	0,26	0,274	27,42
60-70	0,15	0,13	0,15	0,16	0,22	0,162	16,21
50-60	0,09	0,06	0,07	0,08	0,17	0,097	9,72
<50	0,07	0,04	0,03	0,02	0,04	0,040	4,04

Tabla E. 12. Matriz de normalización para el factor Drenaje.

	Pobre	Moderado	Imperfecto	Bien Drenado	Algo Excesivo	Vector Priorización	Porcentaje (%)
Pobre	0,56	0,67	0,43	0,40	0,36	0,484	48,44
Moderado	0,19	0,22	0,43	0,35	0,28	0,294	29,36
Imperfecto	0,11	0,04	0,09	0,17	0,20	0,123	12,32
Bien Drenado	0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,065	6,47
Algo Excesivo	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,034	3,41

Tabla E. 13. Matriz de normalización para el factor Limitantes Principales.

	Drenaje Deficiente	Susceptibilidad Inundación	Susceptibilidad a Erosión Hídrica	Susceptibilidad a Erosión Eólica	Sin Limitaciones	Vector Priorización	Porcentaje (%)
Drenaje Deficiente	0,56	0,64	0,53	0,40	0,35	0,496	49,64
Susceptibilidad Inundación	0,19	0,21	0,32	0,29	0,27	0,255	25,53
Susceptibilidad a Erosión Hídrica	0,11	0,07	0,11	0,23	0,23	0,150	15,02
Susceptibilidad a Erosión Eólica	0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,064	6,45
Sin Limitaciones	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,034	3,36

Tabla E. 14. Matriz de normalización para el factor Intensidad de Cambio de Ocurrencia.

	Ganancia Máxima	Ganancia Mínima	Sin cambio	Perdida	No Agua	Vector Priorización	Porcentaje (%)
Ganancia Máxima	0,56	0,67	0,43	0,40	0,36	0,484	48,44
Ganancia Mínima	0,19	0,22	0,43	0,35	0,28	0,294	29,36
Sin cambio	0,11	0,04	0,09	0,17	0,20	0,123	12,32
Perdida	0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,065	6,47
No Agua	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,034	3,41

Tabla E. 15. Matriz de normalización para el factor Ocurrencia.

	>80	60-80	40-60	20-40	<20	Vector Priorización	Porcentaje (%)
>80	0,56	0,67	0,43	0,40	0,36	0,484	48,44
60-80	0,19	0,22	0,43	0,35	0,28	0,294	29,36
40-60	0,11	0,04	0,09	0,17	0,20	0,123	12,32
20-40	0,08	0,04	0,03	0,06	0,12	0,065	6,47
<20	0,06	0,03	0,02	0,02	0,04	0,034	3,41

E.2.3. Cálculo del vector suma ponderada

Tabla E. 16. Vector suma ponderada para el factor Posición del Terreno.

Resultados de la operación de matrices	Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,50 0,77 0,75 0,45 0,30	2,767	5,57
0,17 0,26 0,45 0,32 0,24	1,429	5,60
0,10 0,09 0,15 0,26 0,20	0,794	5,29
0,07 0,05 0,04 0,06 0,10	0,325	5,04
0,06 0,04 0,03 0,02 0,03	0,172	5,11

Tabla E. 17. Vector suma ponderada para el factor Coeficiente de Esguerramiento.

Resultados de la operación de matrices					Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,43	0,55	0,49	0,49	0,28	2,230	5,23
0,21	0,27	0,32	0,39	0,24	1,443	5,26
0,14	0,14	0,16	0,19	0,20	0,838	5,17
0,09	0,07	0,08	0,10	0,16	0,494	5,08
0,06	0,05	0,03	0,02	0,04	0,204	5,04

Tabla E. 18. Vector suma ponderada para el factor Drenaje.

Resultados de la operación de matrices					Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,48	0,88	0,62	0,45	0,31	2,741	5,66
0,16	0,29	0,62	0,39	0,24	1,698	5,78
0,10	0,06	0,12	0,19	0,17	0,643	5,22
0,07	0,05	0,04	0,06	0,10	0,326	5,04
0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,176	5,17

Tabla E. 19. Vector suma ponderada para el factor Limitantes Principales.

Resultados de la operación de matrices					Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,50	0,77	0,75	0,45	0,30	2,767	5,57
0,17	0,26	0,45	0,32	0,24	1,429	5,60
0,10	0,09	0,15	0,26	0,20	0,794	5,29
0,07	0,05	0,04	0,06	0,10	0,325	5,04
0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,172	5,11

Tabla E. 20. Vector suma ponderada para el factor Intensidad de cambio de ocurrencia.

Resultados de la operación de matrices					Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,48	0,88	0,62	0,45	0,31	2,741	5,66
0,16	0,29	0,62	0,39	0,24	1,698	5,78
0,10	0,06	0,12	0,19	0,17	0,643	5,22
0,07	0,05	0,04	0,06	0,10	0,326	5,04
0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,176	5,17

Tabla E. 21. Vector suma ponderada para el factor Ocurrencia.

Resultados de la operación de matrices					Vector Suma Ponderada	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización
0,48	0,88	0,62	0,45	0,31	2,741	5,66
0,16	0,29	0,62	0,39	0,24	1,698	5,78
0,10	0,06	0,12	0,19	0,17	0,643	5,22
0,07	0,05	0,04	0,06	0,10	0,326	5,04
0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,176	5,17

Resumen del Vector Suma Ponderada para cada factor

Tabla E. 22. Resumen de valores del campo Vector Suma Ponderada / Vector Priorización para la obtención del RC para los descriptores de cada factor.

Factor	Vector Suma Ponderada / Vector Priorización		IC	RC
	Suma	Promedio		
Posición del Terreno	26,61	5,32	0,08	0,07
Coeficiente de Escurrimiento	25,78	5,16	0,04	0,04
Drenaje	26,87	5,37	0,09	0,08
Limitantes Principales	26,61	5,32	0,08	0,07
Intensidad de cambio de ocurrencia	26,87	5,37	0,09	0,08
Ocurrencia	26,87	5,37	0,09	0,08

En la Tabla E. 22 se presenta el promedio de los valores del cociente entre el Vector Suma Ponderada y el Vector Priorización, compilando para cada uno de los factores su correspondiente valor máximo de autovalores de la matriz de comparación de pares inicial (λ_{max}), obteniendo el valor de IC, considerando para esta ocasión el n igual a 5 (la cantidad de descriptores por factor). Con este resultado se calcula la RC, utilizando el IA_n con el n anterior, que, según la Tabla 9.5 corresponde a 1,115. Todos los valores de RC calculados se encuentran por debajo de 10% (0,1) argumentando de esta forma que la configuración y ponderación de los descriptores en cada factor es consistente para el análisis y cálculo de la vulnerabilidad hidrológica planteada.