

Universidad Nacional de Rosario  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Proyecto de Grado  
Carrera de Ingeniería Civil

**Validación de un modelo agrohídrológico  
en una cuenca hídrica no aforada con  
datos de campo secundarios.**

**ESTUDIANTES**

Canelo, Santiago C-6951/5  
Carmana, Guido C-6801/2  
Santi, Joaquin S-5247/7  
Sormanni, Germán S-5431/3

**DIRECTORES:**

Dra. Ing. Margarita Portapila

**ASESORES:**

Ing. Franco Trivisonno  
Dr. Ing. Martín Romagnoli  
Dr. Ing. Enrique Montero Bulacio

*Trabajo presentado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

**Ingeniero Civil**

Febrero 2025

## Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
2.1. Objetivo general.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
<b>3. Caracterización de la cuenca.....</b>	<b>6</b>
3.1. Ubicación, extensión y principales aportantes.....	6
3.2. Recursos hídricos superficiales.....	7
3.3. Características geológicas.....	8
3.3.1. Tectónica.....	8
3.3.2. Estratigrafía.....	10
3.4. Análisis de precipitaciones.....	12
3.5. Características climáticas.....	14
3.6. Uso de suelo.....	19
<b>4. Problemática agroecológica e hídrica en Santa Fe.....</b>	<b>22</b>
4.1. Áreas de riesgo hídrico - Ley N°11.730.....	22
4.2. Inundaciones y sequías.....	26
4.3. Contaminación puntual por actividades industriales.....	28
4.4. Pérdida de suelo y excedentes hídricos.....	30
4.4.1. Monocultivo de soja.....	30
4.4.2. Canalizaciones informales.....	33
4.5. Actores gubernamentales y de la sociedad civil que participan de la gestión integrada de la CBRC.....	35
<b>5. Modelo de Simulación Agrohidrológica “Soil and Water Assessment Tool”.....</b>	<b>42</b>
5.1. Introducción.....	42
5.2. Inputs.....	42
5.2.1. Clima.....	43
5.2.2. Ajuste precipitación.....	57
5.2.3. Caudal.....	77
5.2.4. Tipo de suelo (Romagnoli et. al., 2017).....	110
5.2.5. Cuenca.....	111
5.2.6. Uso y gestión del suelo (Romagnoli et. al., 2017).....	124
5.3. Calibración y validación de los parámetros (Romagnoli et. al., 2017).....	124
5.4. Procesos internos.....	127
5.5. Outputs.....	129
<b>6. Resultados.....</b>	<b>130</b>
6.1. Simulación de SWAT en período 1998-2015.....	141
6.1.1. Erosión.....	141
6.1.2. Inundaciones.....	152
6.1.3. Reducción de productividad del suelo.....	160
6.2. Simulación de SWAT en período 2015-2024.....	164
6.2.1. Comparación caudales simulados observados con aforados en Pueblo Andino.....	166
6.2.2. Comparación caudales simulados estimados con aforados en Pueblo Andino.....	171
6.2.3. Comparación simulados observados con simulados estimados.....	173

<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>175</b>
7.1. Conclusiones del proyecto.....	175
7.2. Reflexiones sobre la experiencia grupal.....	177
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>178</b>
<b>9. Anexo.....</b>	<b>182</b>
9.1. Recopilación de datos de campo secundarios.....	182
9.2. Entrevistas con actores claves.....	191
9.2.1. Ing. Roberto Porta - Consultar Ingeniería - Candelaria Integrada Asociación Civil (09/10/2024).....	191
9.2.2. Ing. Silvina Martín - Secretaría de Recursos Hídricos - Sistemas de Predicción Hidrológica (15/10/2024).....	193
9.2.3. Ing. Raúl Navarro - Sub Director de la Delegación Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (29/11/2024).....	197
9.3. Scripts para ajuste de Ley H-Q.....	201
9.3.1. Método 3.....	201
9.3.2. Método 5.....	205

## **1.Introducción**

La cuenca del Río Carcarañá abarca una importante superficie que se extiende a lo largo de las provincias de Córdoba y Santa Fe, desembocando en el río Coronda, siendo para la provincia de Santa Fe un área de importante desarrollo agronómico, con suelos y climas propicios para diversos cultivos, principalmente soja, maíz y trigo, lo que se traduce en que un 90% de la Cuenca Baja del Río Carcarañá esté destinada a la agricultura, convirtiéndola en un área de gran importancia económica para la región.

Sin embargo, tanto las diversas localidades como los productores de la zona han experimentado numerosos eventos que ponen en riesgo su producción, sus bienes materiales y por ende su economía, como es el caso de las frecuentes inundaciones, principalmente en el periodo 2000-2015, o también como la severa sequía que atraviesa la región en los últimos años. A esto se le suma una escasez de datos hidrológicos e hidráulicos que dificultan el estudio y modelización de la cuenca, que se pone en evidencia a la hora de comenzar con el desarrollo de un modelo agrohidrológico de la cuenca mediante el software SWAT, para el periodo 1998-2013, llevado a cabo por los ingenieros Margarita Portapila y Martín Romagnoli, que posteriormente se extiende al 2015 por el ingeniero Franco Trivisonno, lo que ha obligado a comenzar un proceso exhaustivo de recolección de información para una representación precisa de la cuenca.

En el presente trabajo, se pretende caracterizar la Cuenca del Río Carcarañá, comprender cómo es la dinámica hídrica de la misma, cuál es la razón de que sea tan adecuada para el desarrollo agronómico de la región y explorar la manera en que se organizan los vecinos, productores y empresas para tratar los temas hídricos de la misma. A su vez, resulta importante conocer los distintos acontecimientos que sucedieron en la misma y que hayan perjudicado a los diversos actores.

Con vistas a continuar con la representación de la cuenca, se indaga en la recolección de los datos de ingreso al modelo que permitan extender la proyección del mismo a la actualidad, y conocer si la representación resulta precisa, validando los resultados obtenidos del mismo con la realidad, a partir de noticias, imágenes satelitales e información suministrada por distintos actores.

## **2.Objetivos**

### **2.1.Objetivo general**

Validar los resultados de un modelo agrohidrológico continuo de la cuenca del Río Carcarañá con datos de campo para el período 1998-2024, en la provincia de Santa Fe.

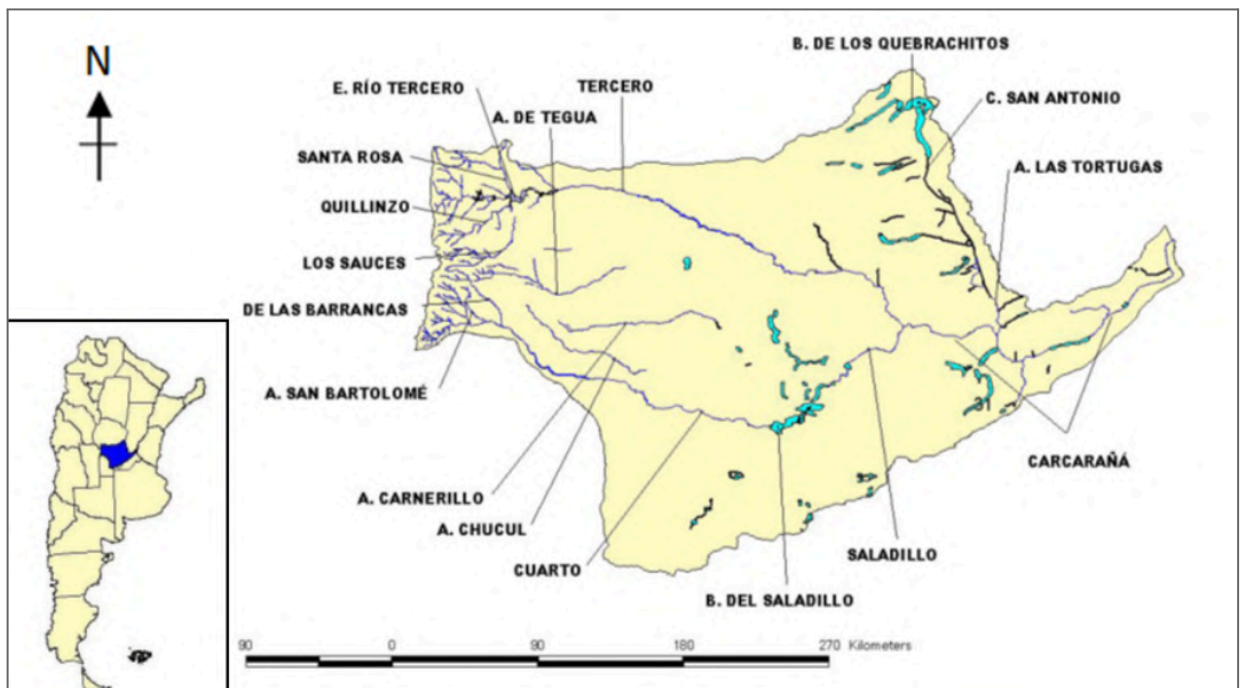
### **2.2.Objetivos específicos**

- Caracterizar la cuenca del Carcarañá en la zona de estudio.
- Analizar la problemática agroecológica e hídrica en la provincia de Santa Fe.
- Determinar los caudales diarios y datos climáticos para extender la proyección del modelo en el período 2015/2024 a paso diario.
- Comprender el funcionamiento del modelo agrohidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) y analizar sus resultados.
- Obtener el balance hídrico de subcuencas anegadas y no anegadas, y correlacionar con datos de campo secundarios.
- Comparar los resultados obtenidos empleando datos de entrada diarios y mensuales.

### 3. Caracterización de la cuenca

#### 3.1. Ubicación, extensión y principales aportantes

La cuenca del Río Carcarañá se extiende a lo largo de las provincias de Córdoba y Santa Fe, drenando en el río Coronda (afluente del Río Paraná) un área de 48.150 km<sup>2</sup>, dentro de la cual se integran las subcuencas del río Tercero, río Saladillo, arroyo Las Tortugas y río Carcarañá. El río Carcarañá nace dentro de la provincia de Córdoba, a partir de la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo, y continúa su extensión atravesando la provincia de Santa Fe, hasta desembocar en la localidad de Puerto Gaboto. Además de estos dos ríos tributantes, el arroyo Tortugas realiza importantes aportes al río, principalmente en aquellos períodos del año donde se presentan abundantes precipitaciones, al tratarse de un arroyo que fue canalizado para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-oeste de la provincia de Santa Fe. En la *Figura 3.1* se puede observar la extensión completa de la cuenca.



*Figura 3.1. Cuenca del Carcarañá.*

El presente trabajo abarca el sector de la cuenca que se ubica dentro de la provincia de Santa Fe, por lo que dentro del área de interés se encuentran varios arroyos y un importante tramo del río Carcarañá, desde las cercanías de Cruz Alta hasta la desembocadura en Puerto Gaboto, como puede observarse en la *Figura 3.2*, donde se identifican todas las localidades que son afectadas por la cuenca. Abarcando los departamentos San Martín, Belgrano, Iriondo, Caseros, San Lorenzo y General Lopez.

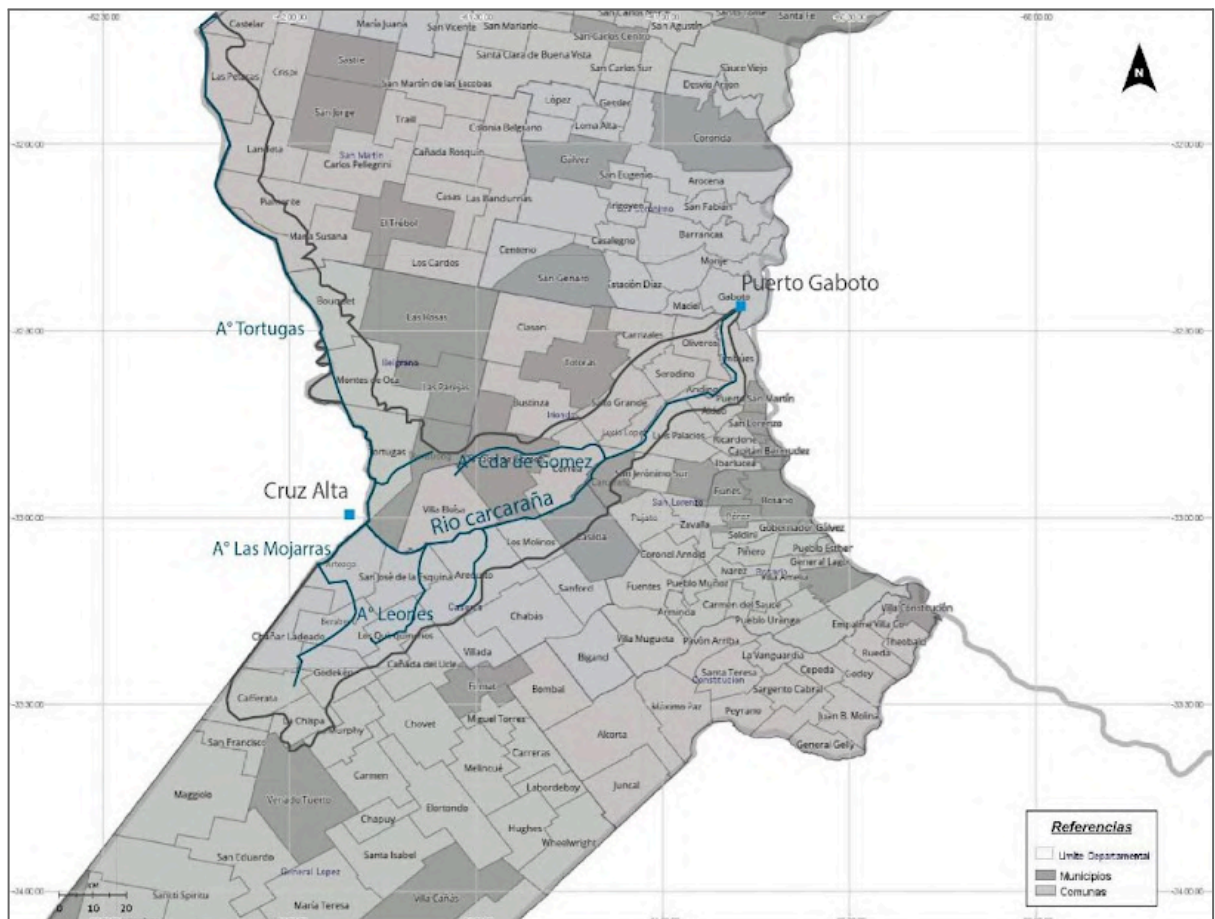


Figura 3.2. Cuenca del Carcarañá en la provincia de Santa Fe.

### 3.2. Recursos hídricos superficiales

Como se puede ver en la Figura 3.3, dentro de la Cuenca del Río Carcarañá en la subregión Santa Fe podemos encontrar los recursos hídricos superficiales principales que se enuncian a continuación:

- **Arroyo Tortugas:** representa el límite geográfico natural noroeste entre las provincias de Santa Fe y Córdoba, desemboca sus aguas en el río Carcarañá a la altura de Cruz Alta. Con una longitud de 190 km y sentido de escurrimiento N-S, es de los mayores aportantes de caudal al Río Carcarañá.
- **Arroyo De Las Mojarras:** representa el límite geográfico natural suroeste entre las provincias de Santa Fé y Córdoba desde su inicio, en la laguna con su mismo nombre, desemboca sus aguas en el río Carcarañá a la altura de Cruz Alta. Con sentido de escurrimiento S-N, y una cuenca de aporte de aproximadamente 190.000 has.

- **Arroyo Cañada de Gomez:** afluente principal sobre la margen izquierda del Río de 50km de longitud, que pasa por la localidad Cañada de Gómez y desemboca en las proximidades de la localidad de Carcarañá.
- **Río Carcarañá:** el río toma este nombre tras la confluencia del río Tercero y el sistema conformado por los ríos Cuarto y Saladillo, en la provincia de Córdoba, e ingresa en la provincia de Santa Fe en cercanías de la localidad de Cruz Alta. Desde dicha localidad, el río recorre 168 km hasta su desembocadura en el Río Coronda en la localidad de Puerto Gaboto.

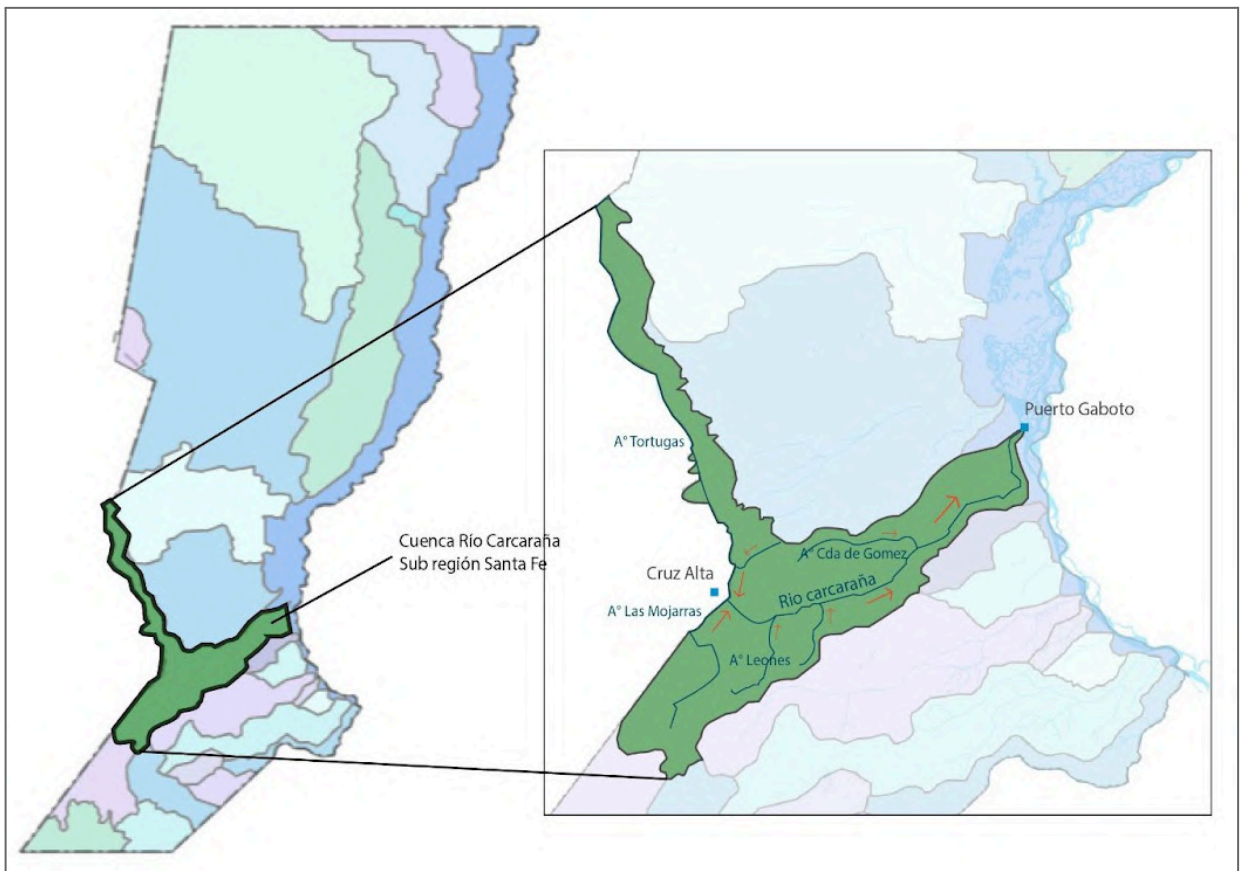


Figura 3.3. Dinámica hídrica superficial Cuenca del Río Carcarañá en la provincia de Santa Fe.

### 3.3. Características geológicas

#### 3.3.1. Tectónica

El río Carcarañá, en su tramo final, desde Pueblo Andino hacia Pueblo Gaboto, presenta la particularidad que su recorrido se produce en sentido sur-norte, es decir, inverso a como se presenta el escurrimiento del río Paraná, situación algo inusual. Este comportamiento se explica a partir de una falla geológica que produjo pequeños bloques tectónicos en el lecho del río, los cuales basculan y se orientan hacia el este, provocando que las barrancas que están en el oeste sean más altas.

A su vez, gran parte de la cuenca se encuentra abarcada por el Bloque de San Guillermo, definido por Kröhling e Iriondo (2003), se trata de una superficie elevada, de unos 17.800 km<sup>2</sup>, con desniveles de entre 15 y 35 m respecto a las unidades vecinas, que está limitado por fallas y fracturas reactivadas por neotectónica. El bloque se extiende fundamentalmente en la provincia de Santa Fe, y abarca pequeños sectores de Córdoba, encontrando su límite oeste en la falla Tostado-Selva (definida por Pasotti y Castellanos, 1963), que presenta una traza irregular, formada por una sucesión de segmentos rectos de 10 a 30 km de longitud, con dirección general norte-sur. La falla comienza al norte de la localidad de Tostado, y se extiende hacia el sur, hasta encontrarse con la margen norte del río Carcarañá, a 420 km de distancia.

El límite oriental del bloque lo representa la escarpa de la falla El Trébol (definida por Pasotti y Castellanos, 1963; Kröhling, 1998), de unos 3 a 8 km de ancho y 15 a 30 m de desnivel. Mientras que, el límite sur, corresponde a una dislocación menor ortogonal a la falla Tostado - Selva y que es recorrida por el río Carcarañá entre Arteaga y Berreta (Pasotti y Castellanos, 1963). En la *Figura 3.4* se observa la región en la que se extiende este bloque.



Figura 3.4. Esquema de los límites del Bloque de San Guillermo. (Marcelo H. Polare, 2019).

### 3.3.2. Estratigrafía

La definición de la estratigrafía de la cuenca se basa en estudios realizados por Kröhling e Iriondo en el año 2003, y en el análisis efectuado por el ingeniero Marcelo H. Polare en el año 2019. La cuenca presenta dos sectores con estratigrafía marcada:

- El primer sector corresponde a aquel donde se encuentra el Bloque de San Guillermo, donde fueron realizadas perforaciones que atravesaron una columna de 60,30 m de potencia, que integraba 54 m de loess primario, con intercalaciones palustres que abarcaban tres unidades formacionales, que se encuentra por encima de 6,30 m de limo arcilloso palustre, en contacto con una formación marina miocena (Fm Paraná), que abarca un estrato de arenas cuarzosas muy finas de color amarillento, que yacen sobre un paquete de pelitas verdes y en ocasiones laminadas, y que hacia abajo pasan a facies de arcillas grises, verdes y azuladas, representativa de un ambiente marino somero. Este perfil estratigráfico se presenta en la *Figura 3.5*.

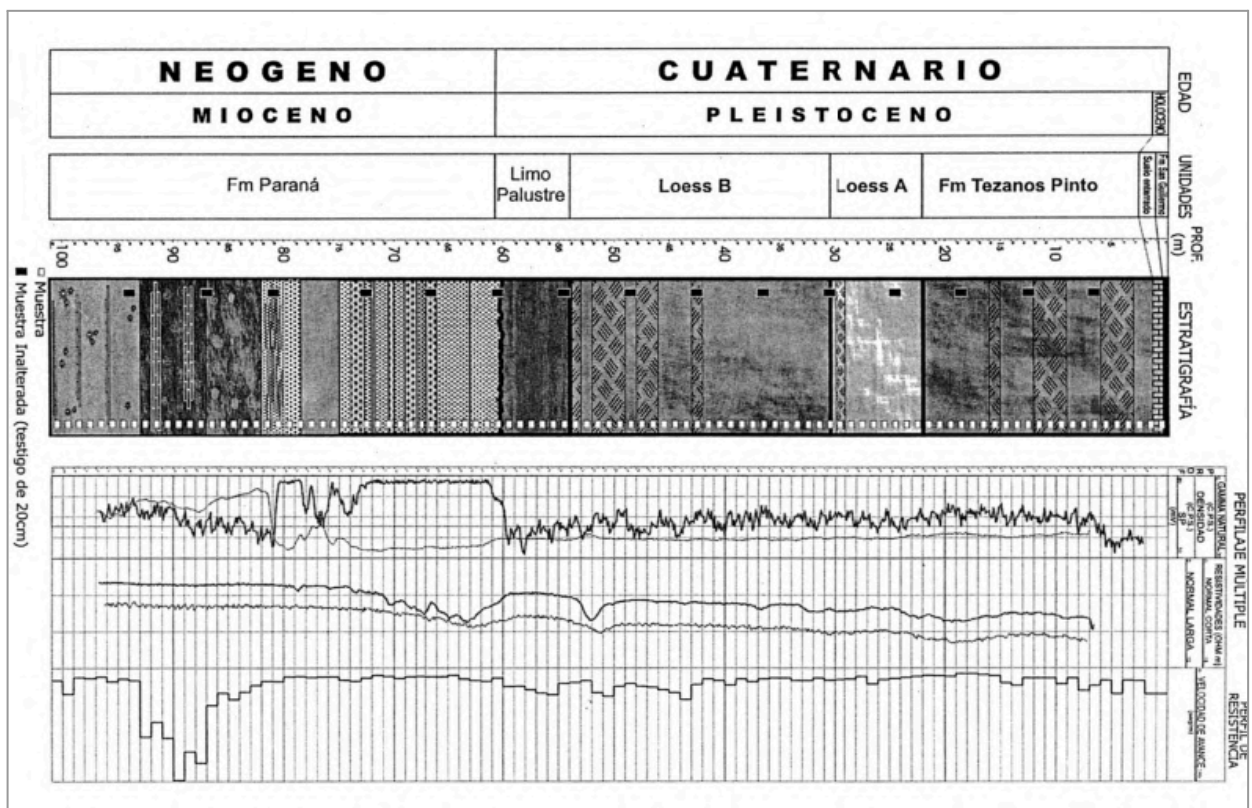


Figura 3.5. Perfil estratigráfico del Bloque de San Guillermo. (Kröhling e Iriondo, 2003).

- En las zonas por fuera del bloque se observa que la unidad limosa palustre mencionada en la estratigrafía anterior no se encuentra, siendo probablemente eliminada por erosión fluvial. Para este sector, se utilizaron, adicionalmente, observaciones de perfiles de las canteras de Tortugas y

Carcarañá, concluyendo que la estratigrafía la conformaban:

- Un paquete loésico cuaternario (conteniendo intercalaciones palustres).
- Arenas, incluyendo facies de la Formación Paraná y arenas del acuífero Puelche.
- Facies pelíticas de la Formación Paraná.

Finalmente, en la *Figura 3.6*, se presentan perfiles estratigráficos observados en distintas localidades de la región.

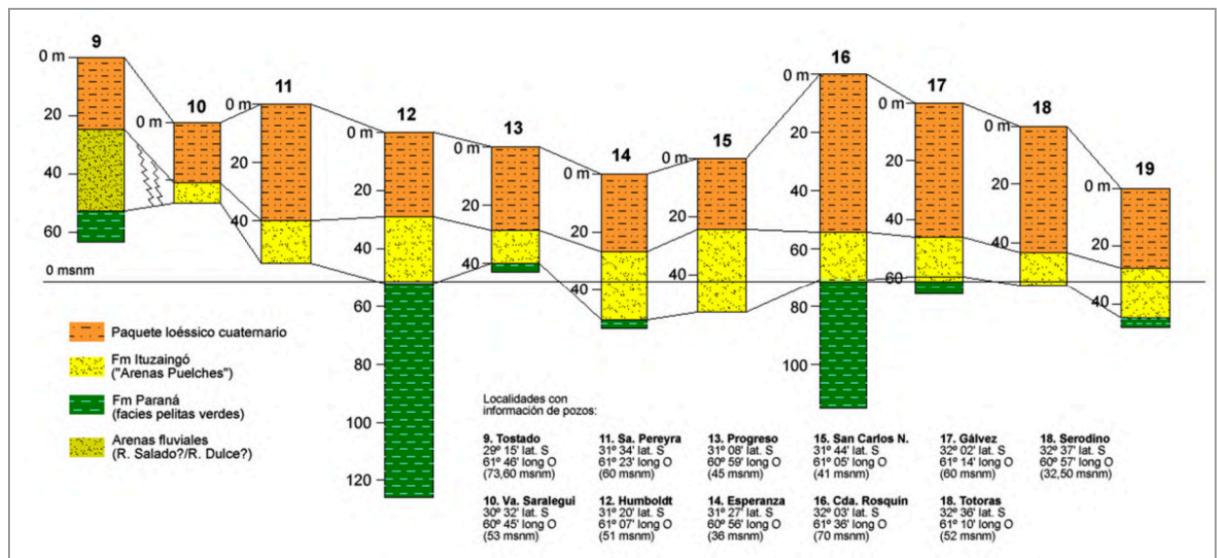


Figura 3.6. Perfiles estratigráficos al este del Bloque de San Guillermo. (Kröhling e Iriondo, 2003).

Los estratos loésicos presentes en el sector superior de las columnas, observadas tanto en el bloque como por fuera del mismo, se caracterizan por contar con un coeficiente de permeabilidad vertical mayor que el horizontal, favoreciendo la infiltración hacia los estratos inferiores arenosos, pero dificultando el flujo subsuperficial.

### 3.4. Análisis de precipitaciones

Para poder entender las precipitaciones en la provincia de Santa Fe, se hace un análisis general para luego hacer foco en la zona de estudio, se hace referencia a un artículo de la revista RIA el cual hace mención a un estudio sobre la variabilidad de las precipitaciones en la zona realizado en conjunto por el Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) y la Universidad Nacional del Litoral (UNL). El mismo se realiza con datos obtenidos de 8 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Éste trabajo tuvo como objetivo estudiar la variabilidad, los cambios en la precipitaciones y sus extremos en las distintas regiones de la provincia de Santa Fe. En cuanto a los resultados del estudio se destaca un aumento en las precipitaciones anuales de un 15% a partir de la década de 1960 en comparación con la primera mitad del siglo XX con un aumento en la frecuencia y magnitud de los eventos de lluvia en toda la provincia. Además, los días secos consecutivos han aumentado de manera significativa en las últimas décadas. Esto último nos alerta de que habrá menor cantidad de días de lluvia pero de mayor intensidad y mayor volumen de agua. Por último, se podrían producir déficits estacionales con mayor frecuencia, principalmente en el norte de la provincia.

Finalmente, concluyen que existe abundante evidencia que demuestra que los cambios en la frecuencia, intensidad, duración y extensión espacial de tales eventos aumentarán la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas dinámicos socioecológicos ocasionando desastres sin precedentes. En este contexto surge la necesidad de mejorar los sistemas de gestión de riesgo climático que enfrentará la provincia para lo cual resulta fundamental el conocimiento de la variabilidad y los cambios históricos en la precipitación y sus extremos. De esta manera, los tomadores de decisiones pueden contar con información con base científica para la elaboración de políticas públicas orientadas a aumentar la resiliencia ante desastres de origen hidroclimático en la provincia.

Adicionalmente, en la *Figura 3.7*, se muestran los resultados obtenidos y procesados de la estación de Marcos Juárez la cual, si bien se encuentra por fuera de la zona de estudio, se ubica cerca de los límites de esta y aguas arriba de la cuenca, por lo que las precipitaciones en esta localidad derivan en aportes para el sector a estudiar.

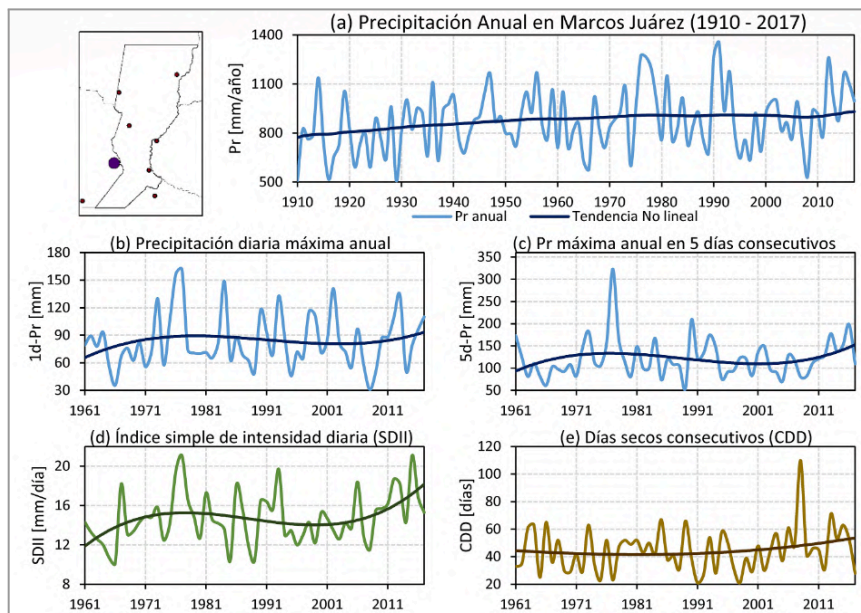


Figura 3.7. Series temporales en Marcos Juárez. (extracto de artículo del RIA).

Se puede observar un crecimiento en la tendencia de la precipitación anual, seguido de una precipitación máxima anual en 5 días consecutivos creciente desde 1961 a la actualidad y finalmente un crecimiento en la cantidad de días secos consecutivos desde el comienzo de las mediciones hasta la actualidad. Para tomar dimensiones de las precipitaciones en la zona de estudio se buscó en la página del INTA digital la precipitación media anual en la región:

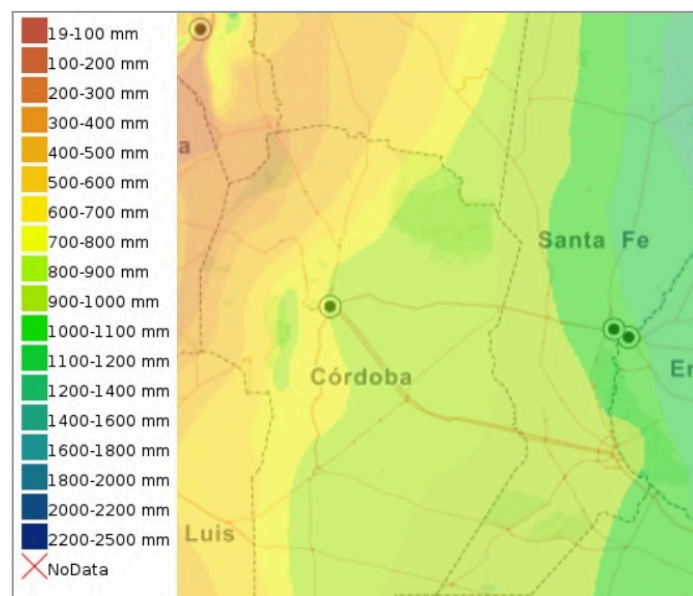
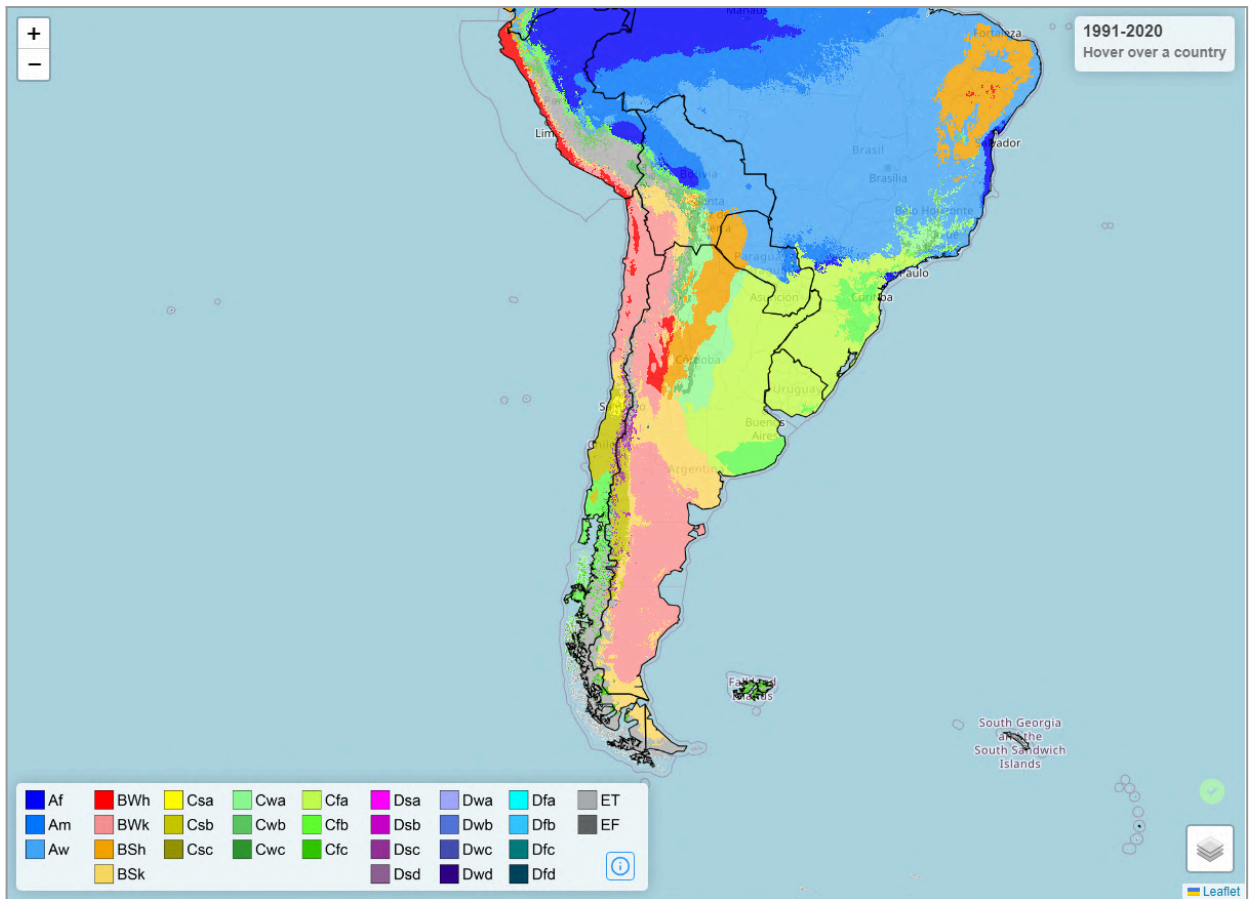


Figura 3.8. Imágen satelital de GEO INTA con precipitación media anual.

En la Figura 3.8, se puede ver que tomando un promedio areal, la región se encuentra entre 900 y 1000 mm anuales.

### 3.5. Características climáticas

En primer lugar, de acuerdo al sistema de clasificación climática Köppen - Geiger, la zona en estudio que incluída dentro del tipo Cfa, clima subtropical húmedo (*Figura 3.9.*). La cual indica que los veranos son cálidos y húmedos, los inviernos templados y menos húmedos con algunas heladas, sin estación seca (Kottek *et al.*, 2006).



*Figura 3.9. Mapa virtual de clasificación climática de Köppen-Geiger.*

La provincia de Santa Fe se ubica dentro de la llanura chaco-pampeana, presentando suaves ondulaciones en su terreno. De acuerdo a la *Figura 3.10*, mapa ambiental de la misma (IDESF - Gobierno de Santa Fe), la zona en estudio se encuentra dentro de la región ambiental perteneciente a la **Pampa Húmeda**.



Figura 3.10. Mapa de regiones ambientales de la provincia de Santa Fe.

En esta región caracterizada como Pampa Húmeda, predominan pastizales y una moderada cantidad de árboles cuya presencia se encuentra principalmente cercana a los cursos de agua. Con respecto a la fauna, las principales especies que se pueden encontrar son cuis, lechuzas, comadreas y zorrinos.

La temperatura media anual para la zona de estudio, es cercana a 18° C. Esto se puede observar con la isoterma de 18° C de la Figura 3.11, mapa de climas (IDESF - Gobierno de Santa Fe).

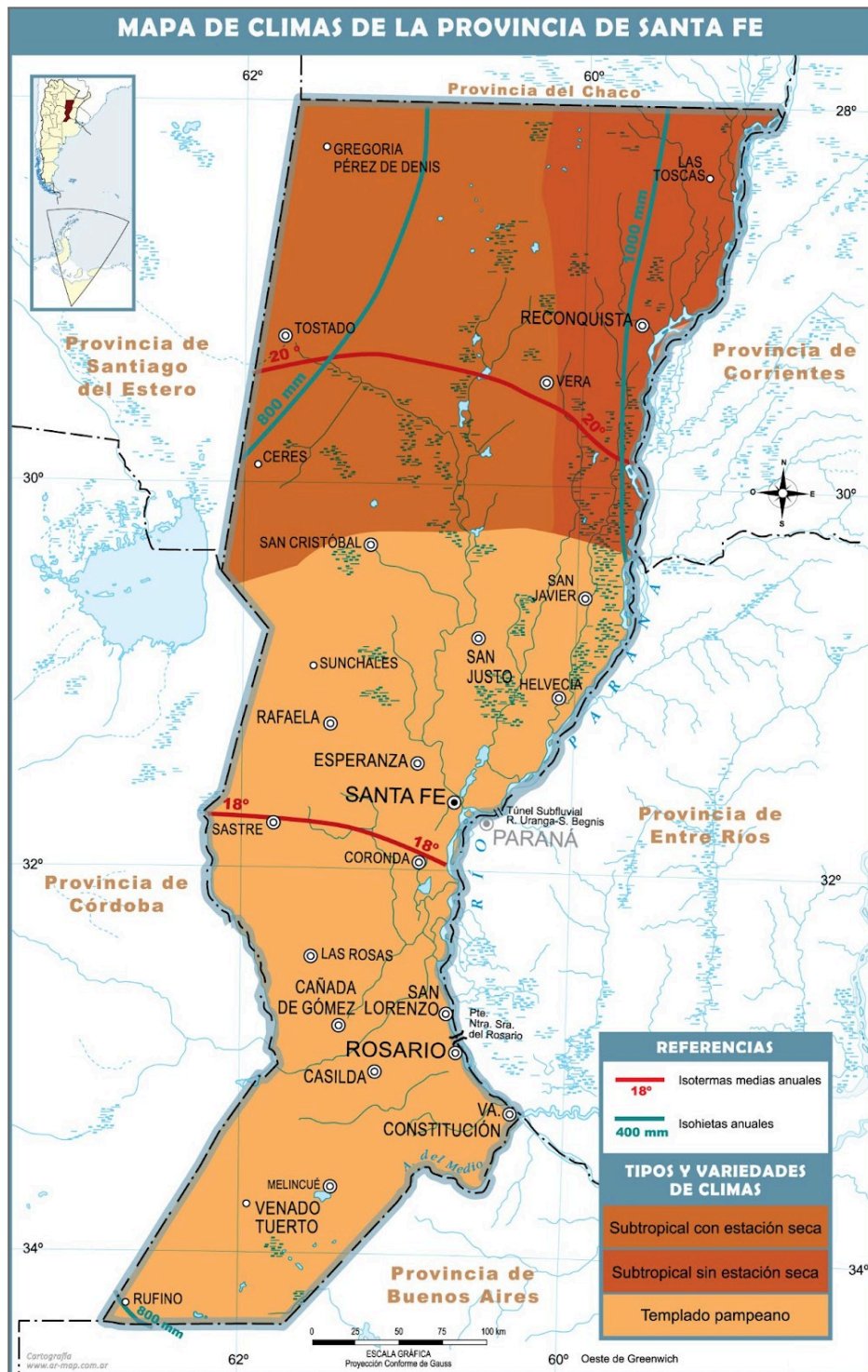
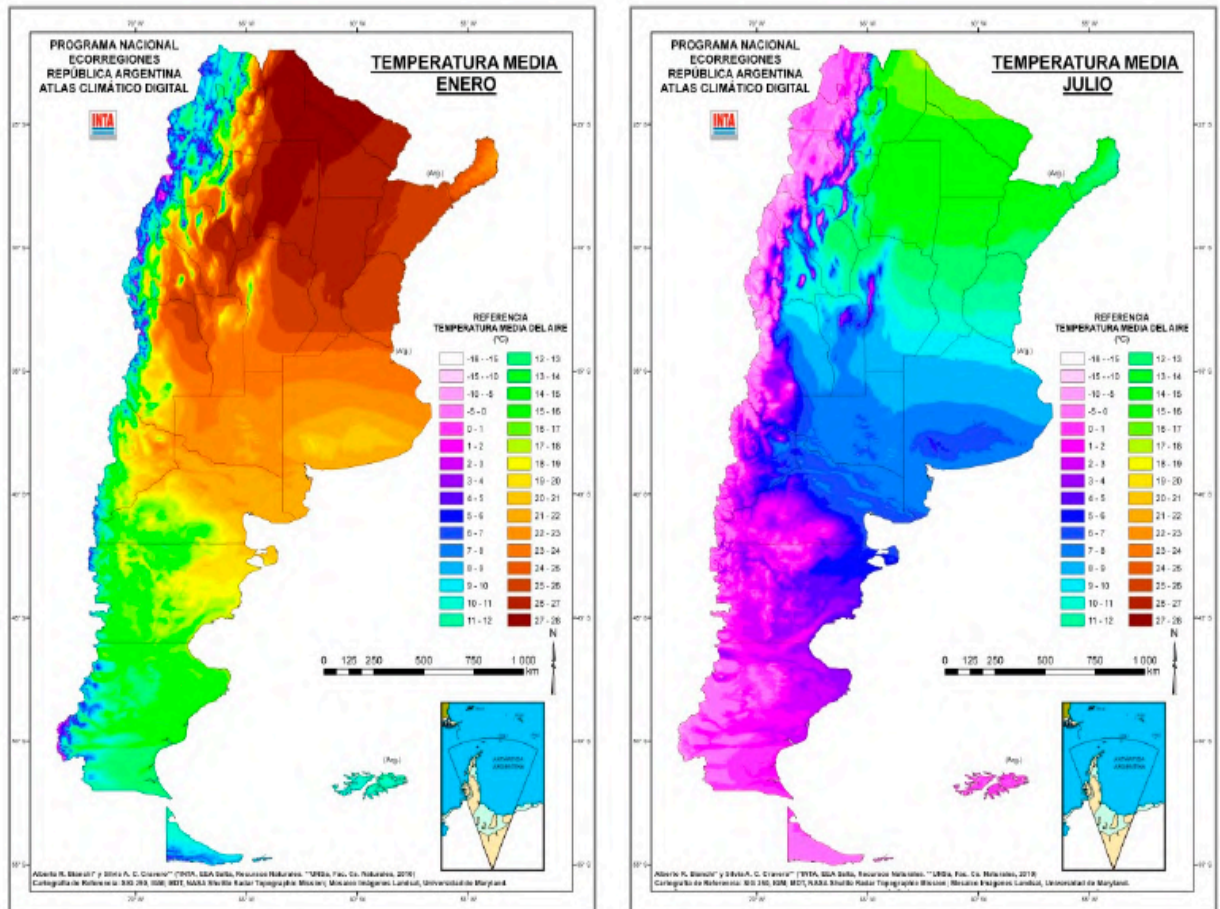


Figura 3.11. Mapa de climas de la provincia de Santa Fe.

También, según el Atlas climático digital de la República Argentina del INTA (Bianchi y Cravero, 2010), para el período 1921-2000, se puede obtener la misma temperatura media anual de 18° C.

Además, permite analizar, para el mismo período, la temperatura media mensual del mes más cálido (enero) oscila entre 25° C y 26 ° C, y en el más frío (julio) se encuentra aproximadamente en el rango de 10° C a 11° C, *Figura 3.12*.



*Figura 3.12. Temperatura media mensual de enero y julio (período 1921-2000).*

*(Fuente: Bianchi y Cravero, 2010)*

Para terminar de caracterizar el clima de la zona en estudio, se consideran las 2 estaciones más cercanas y representativas, y se hace uso de los valores medios de temperatura y precipitaciones para el período 1991-2020 (Servicio Meteorológico Nacional, 2020), *Figuras 3.13 y 3.14*.

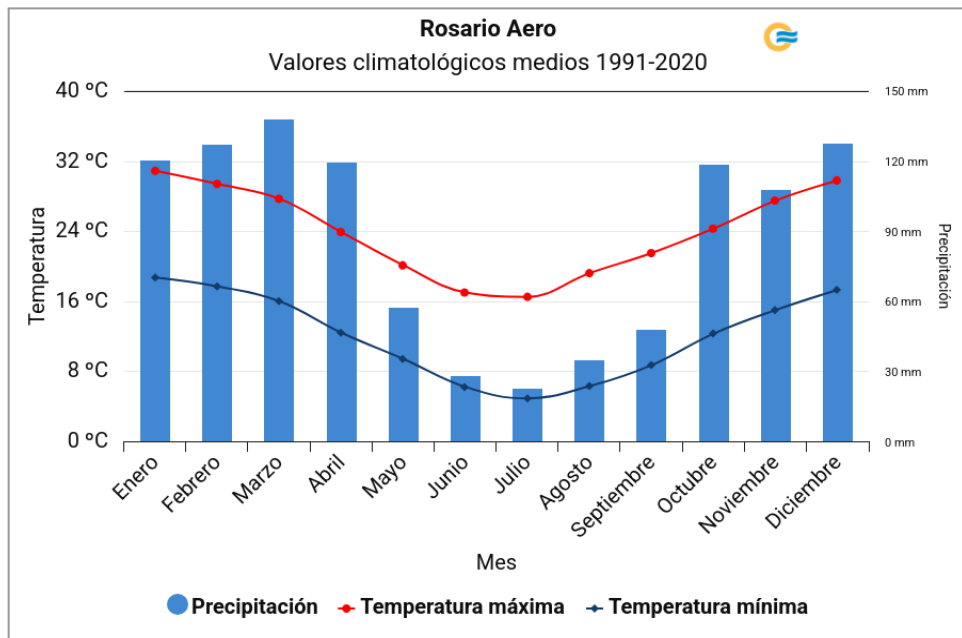


Figura 3.13. Temperatura y precipitación media mensual, estación Rosario (período 1991-2020).

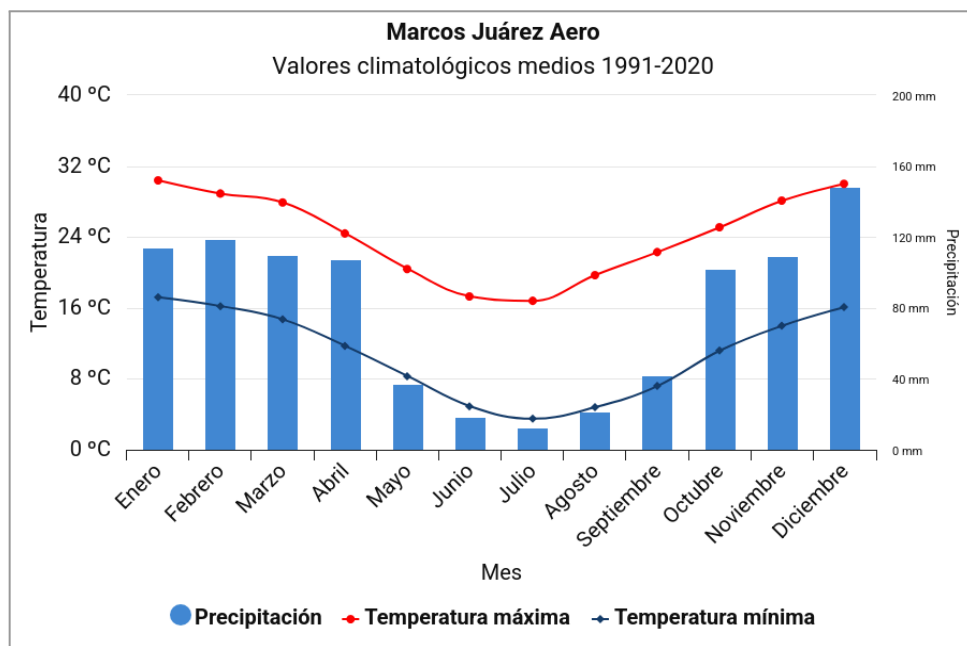


Figura 3.14. Temperatura y precipitación media mensual, estación Marcos Juárez (período 1991-2020).

Se puede concluir que los máximos mensuales se producen entre el verano y el otoño (diciembre a abril), mientras que los mínimos se presentan en invierno (junio a agosto). Además, se destaca un período húmedo, con la mayor cantidad de precipitaciones entre octubre y marzo.

### **3.6. Uso de suelo**

La zona en estudio presenta un ciclo climático favorable y suelos con gran aprovechamiento para la realización de dos actividades primarias como la agrícola, particularmente con el cultivo de maíz, girasol, sorgo, soja y trigo, y la ganadera. También se destaca el desarrollo de actividad industrial.

De acuerdo a la serie de estadística agrícola por cultivo (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, 2024), considerando los promedios de producción agrícola en el período 1998/2024, la provincia de Santa Fe representa aproximadamente el 21,5% de la superficie sembrada del país, siendo una de las principales productoras de oleaginosas y cereales.

A partir del mapa interactivo de zonas agropecuarias elaborado por IDESF - Infraestructuras de Datos Espaciales de la provincia de Santa Fe (*Figura 3.15*) y discretizando para la cuenca en estudio, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La actividad agrícola pura (AA) es la principal, donde se destaca la producción de oleaginosas (soja de 1<sup>era</sup>, soja 2<sup>da</sup> y girasol) y cereales (maíz, sorgo y trigo).
- Se identifica, alrededor del Río Carcarañá, el desarrollo de actividad ganadera y agrícola (GA), en una menor proporción que la agrícola pura (AA).
- En cercanía de los cursos de agua se desarrolla la actividad ganadera en sus distintas variantes: ganadera cría (GG\_C), ganadera invernada (GG\_I), en sus distintas combinaciones, acompañadas en algunos casos de tambo (T).

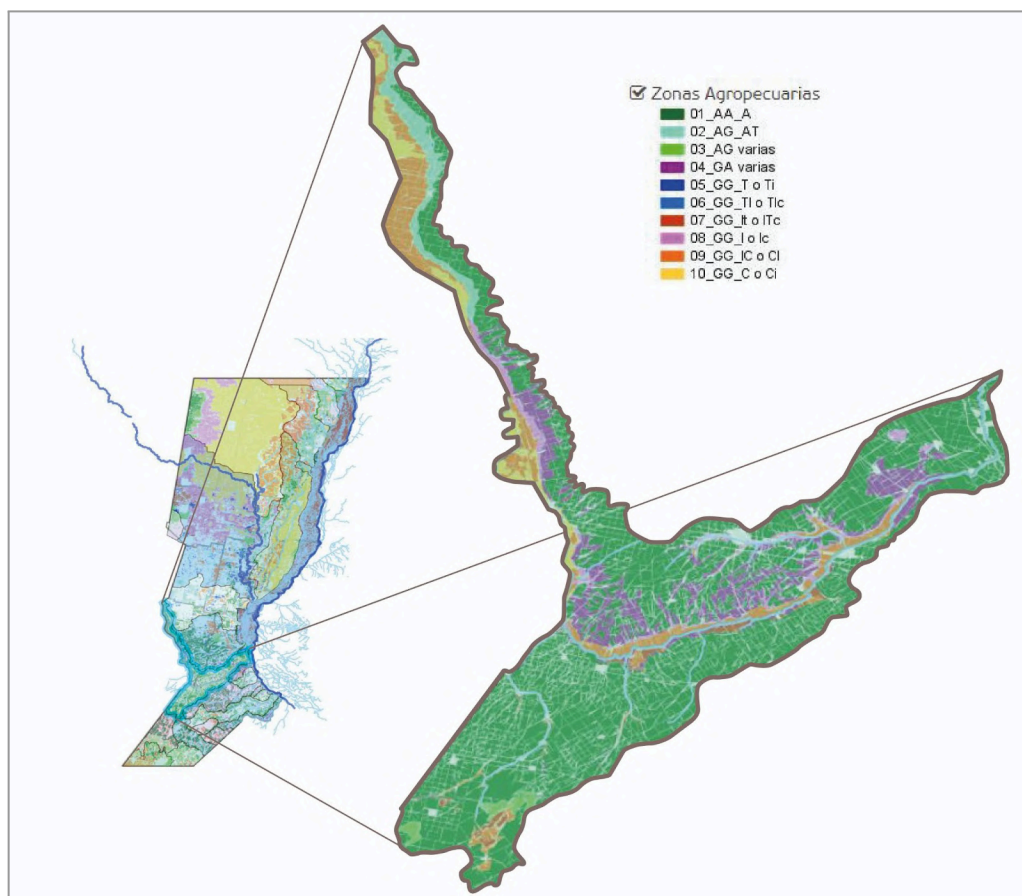


Figura 3.15. Zonas agropecuarias de Santa Fe.

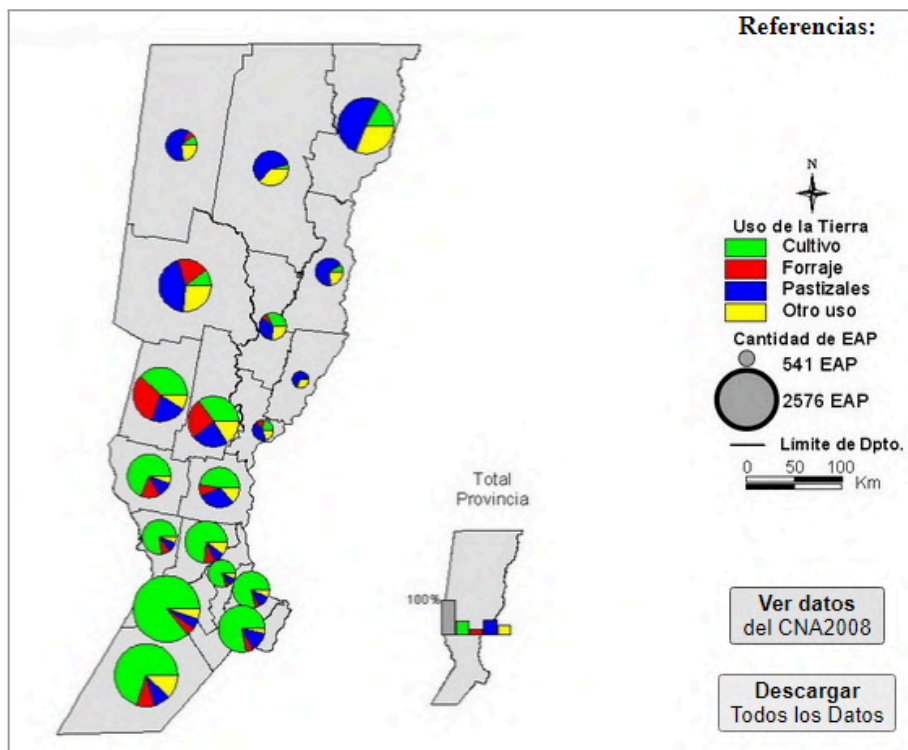
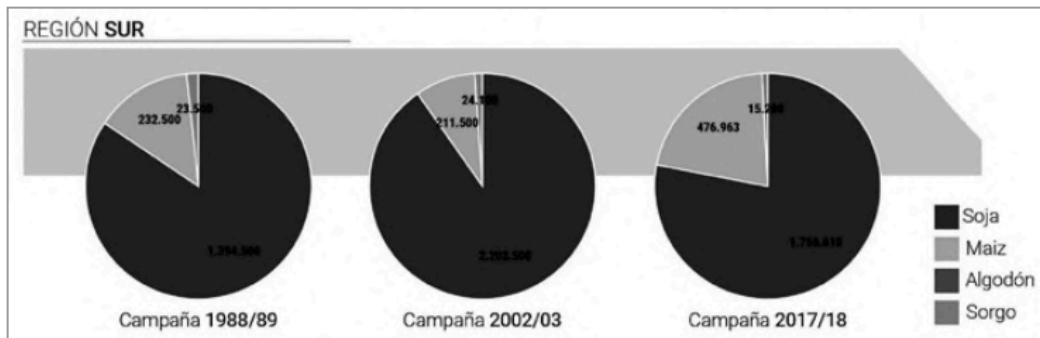


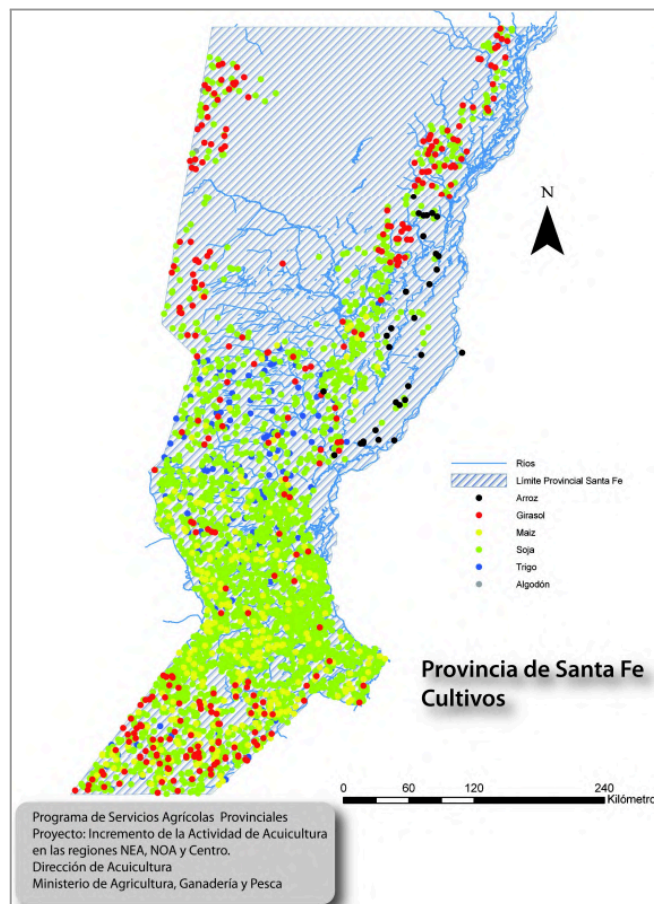
Figura 3.16. Uso de la tierra (CNA, 2008).

Teniendo en cuenta el Censo Nacional Agropecuario del año 2008 (CNA 2008), que se presenta en la *Figura 3.16*, se puede confirmar algunas de las conclusiones indicadas, reforzando la idea que en el área de estudio una de las actividades principales es el cultivo.

En el área de estudio, de acuerdo a la superficie ocupada, el principal cultivo es la soja, seguida por el trigo y el maíz. También, en menor proporción, están presentes cultivos de girasol, sorgo, lino, etc. Dicha distribución puede apreciarse en las *Figuras 3.17* y *3.18*.



*Figura 3.17. Evolución de cultivos en distintas campañas. (Propersi et al., 2019).*



*Figura 3.18. Distribución de los principales cultivos de la provincia durante el quinquenio 1996-2000 (Alejandro Diego Crojethovich, 2012).*

#### 4. Problemática agroecológica e hídrica en Santa Fe

Las localidades que se encuentran dentro de la Cuenca del Río Carcarañá, han sufrido en numerosas ocasiones problemáticas hídricas, ya sea provocadas por inundaciones, sequías, o por intervención antrópica. A continuación se evalúan las distintas problemáticas a la que fueron sometidas diversas localidades.

##### 4.1. Áreas de riesgo hídrico - Ley N°11.730

En la provincia de Santa Fe tiene vigencia la Ley provincial N° 11.730 - Áreas de Riesgo Hídrico, aprobada en su texto original el 11 de abril de 2000. La misma tiene por objeto regular el uso de los bienes situados en las áreas inundables dentro de la jurisdicción provincial. La autoridad de aplicación es el Ministerio de Obras, Servicios Públicos y Vivienda, actualmente denominado como Ministerio de Obras Públicas, pero también le otorga la posibilidad a que cada Municipio o Comuna de la provincia elabore su propia zonificación de uso de suelo en áreas inundables, la cual debe ser aprobada por la autoridad de aplicación, es decir, por el Ministerio mencionado. También establece las prohibiciones, restricciones y advertencias de uso. Según la ley, la autoridad de aplicación es la encargada de definir y delimitar cada una de las zonas inundables. Las mismas se clasifican en tres categorías:

- **Área I:** corresponde a los cauces naturales y artificiales, y cuerpos de agua permanente.
- **Área II:** corresponde a las vías de evacuación de crecidas y área de almacenamiento. Donde no pueden realizarse obras, actividades ni emprendimientos públicos o privados que impidan el escurrimiento natural de las aguas. La autoridad puede autorizar una actividad, si no se impide el escurrimiento natural y se adoptan las previsiones para anular el riesgo de inundación o desarrollar actividades compatibles con el riesgo.
- **Área III:** Corresponde a las áreas con riesgo de inundación no incluidas en las Áreas I y II.

Y en las zonas protegidas contra inundaciones, permite desarrollar sólo usos compatibles con el riesgo, debiendo el Estado Provincial reglamentar su utilización. Finalmente aclara la elaboración de un plan de emergencia frente a estos eventos.

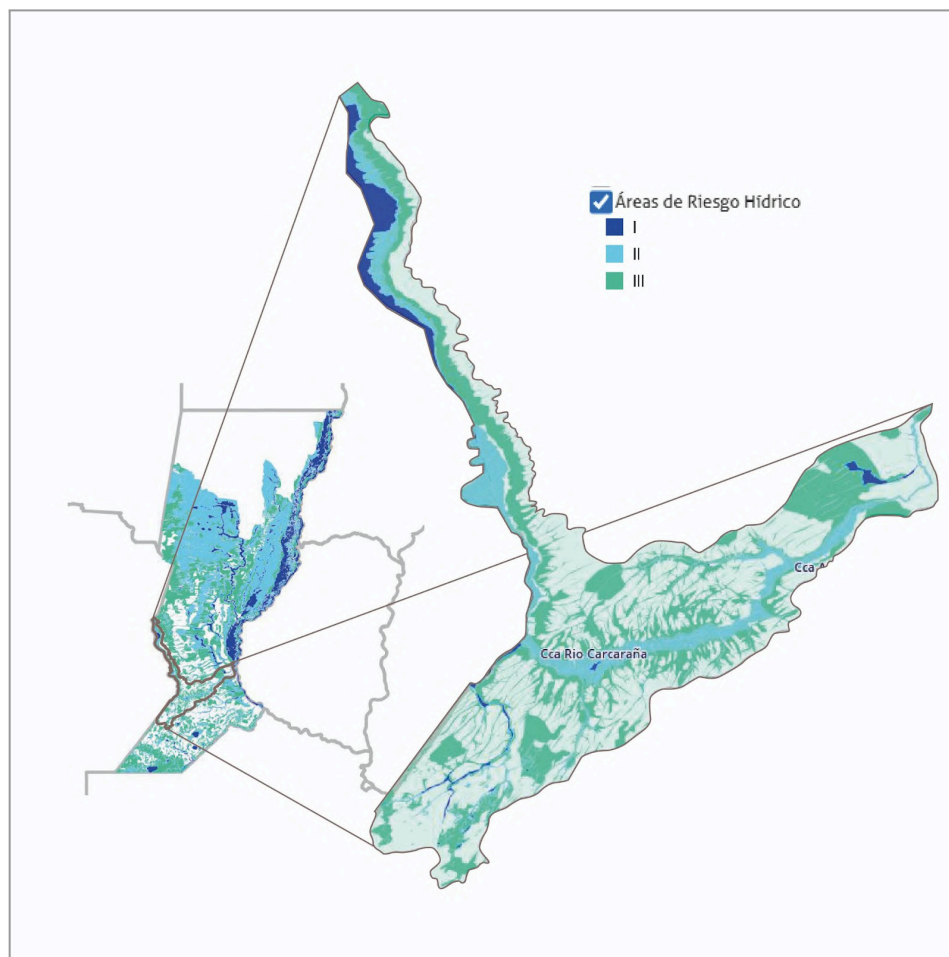
Luego, la autoridad mencionada, para poder implementar la ley, realizó la zonificación y regulación del uso del suelo en las áreas inundables de la provincia. Para ello, empezaron por la recopilación y análisis de antecedentes, luego elaboraron el mapa hidrográfico, en base a información brindada por el Servicio de Catastro e Información Territorial (SCIT), el Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente

de la Provincia de Santa Fe (MASPyMA), imágenes satelitales y cartas del IGN, y realizaron los estudios hidrológicos, para finalmente realizar la delimitación de las áreas de riesgo hídrico.

Realizaron distintos procedimientos para poder realizar las delimitaciones según cada área definida, utilizando imágenes satelitales complementadas con criterios edafológicos y geomorfológicos. Para el área I, utilizaron imágenes satelitales digitalizando la superficie anegada para una recurrencia de 2 años. Luego, con el área II, adoptaron una recurrencia de 10 años con excepción del sistema del Río Paraná donde contaba con imágenes satelitales de mayor recurrencia (15 a 20 años), y para el área III, usaron criterios edafológicos complementados con criterios geomorfológicos.

*Obs.: aplicar criterios edafológicos significa evaluar las distintas características que presenta el suelo luego de haber estado sometido a anegamientos como son los colores, moteados, concreciones ferromangánicas, entre otros.*

A su vez, la Infraestructura de Datos Espaciales de Santa Fe (IDESF), confeccionó cartas de riesgo hídrico a una escala macroscópica, cubriendo una localidad completa en cada carta, pero a diferencia de las elaboradas de acuerdo a la ley 11.730, estas se basan en imágenes satelitales, cartas topográficas y estudios en algunos loteos, sin estar asociadas a una recurrencia dada, por lo que si bien son útiles para comprender inicialmente la zonificación de un determinado sector, resulta una descripción cualitativa. Otra diferencia es que se considera una cuarta área, la número IV de zona no inundable. Esta división es la que se puede visualizar en las *Figuras 4.1 y 4.2*.



*Figura 4.1. Áreas de riesgo hídrico, provincia de Santa Fe y cuenca del Río Carcarañá.*

A partir de la *Figura 4.1*, se pueden individualizar las distintas áreas de riesgo hídrico. De forma aproximada se puede decir que el 60% de la cuenca está catalogada dentro de alguno de los tipos de áreas con riesgo de inundaciones, por lo cual será un factor importante en el momento de realizar el análisis de la problemática.

Finalmente, a modo de ejemplo, se presenta en la *Figura 4.2.*, la carta temática elaborada por el IDESF correspondiente a la ciudad de Carcarañá, una de las cuales será utilizada más adelante para llevar a cabo el análisis.

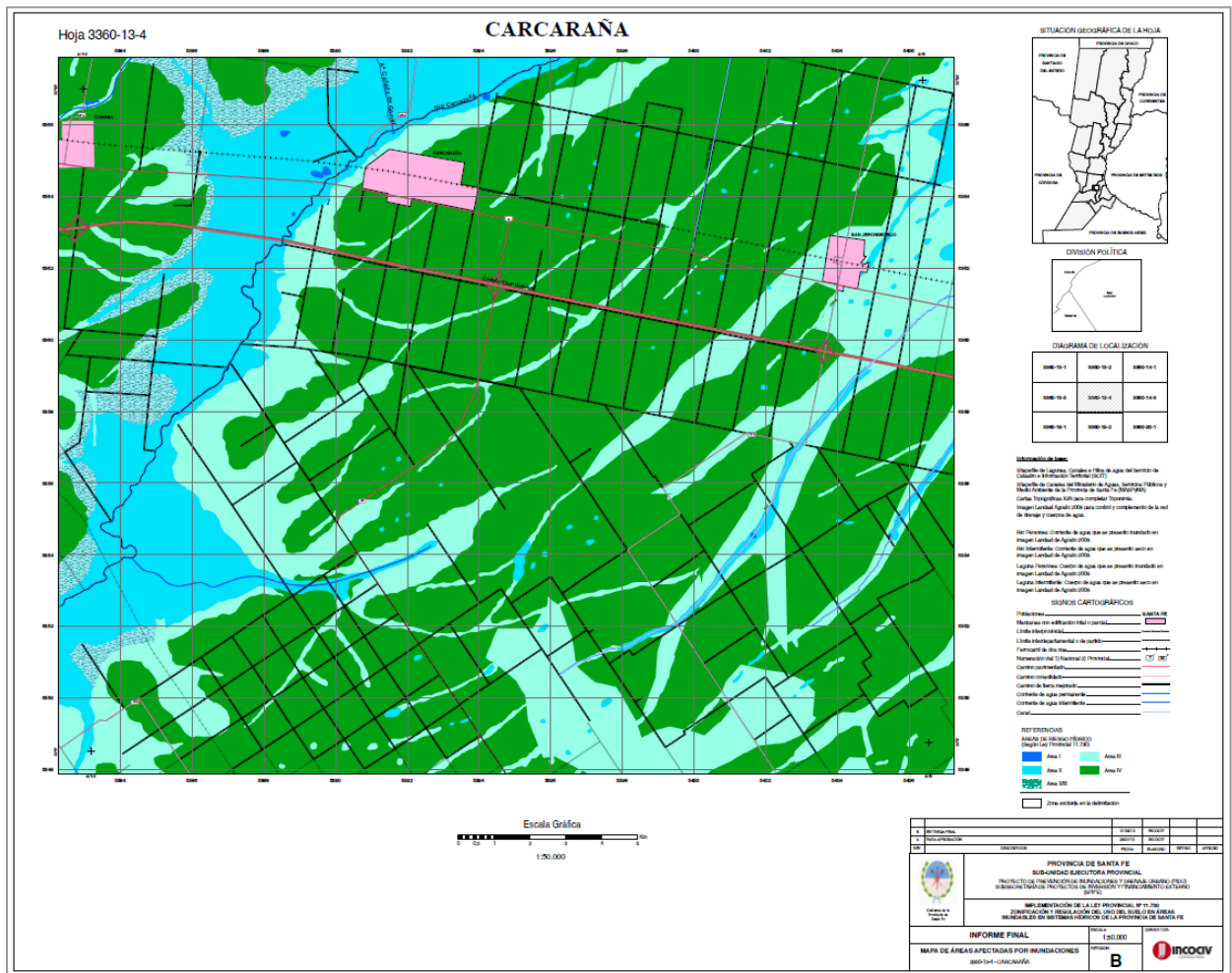


Figura 4.2. Mapa de áreas afectadas por inundaciones - Carcarañá. Provincia de Santa Fe.

Analizando el área en estudio y, la subdivisión y clasificación de subcuencas realizadas más adelante en este informe, si se agrupan los bajos, con las subcuencas que contienen al Río Carcarañá y aquellas que mediante el análisis de las problemática se detectaron inundaciones, se puede de forma general y aproximada decir que el 74,07% del área en estudio puede ser considera como área inundable dentro del orden inferido mediante las áreas de riesgo hídrico definidas para la provincia de Santa Fe.

<b>Cantidad de subcuencas</b>	<b>27</b>	<b>100.00%</b>
<b>Áreas inundables</b>	<b>20</b>	<b>74.07%</b>
<b>Áreas no inundables</b>	<b>7</b>	<b>25.93%</b>

Tabla 4.1. Áreas inundables y no inundables estimadas para el área en estudio.

#### 4.2. Inundaciones y sequías

Las crecidas del río Carcarañá en diversos periodos han provocado importantes inundaciones en la región, que se traducen en el desalojamiento de la población, interferencias en el tránsito, pérdidas materiales y heridos. En el *Anexo 9.1*. se presenta una tabla donde se detallan, para cada localidad de la cuenca, noticias en donde distintos actores realizan reclamos a entidades gubernamentales o productores de la zona, a causa de inundaciones o sequías. También se incorporan noticias de carácter informativo, donde el redactor informa acerca de las problemáticas del evento desde su mirada, con el fin de tener un horizonte temporal en el que se producen dichos eventos.

Uno de los eventos que más se hace presente, es el de la crecida del río Carcarañá en 2015, en este año los efectos provocaron que en localidades como Timbúes alcanzara a ingresar agua en los hogares, debiendo desalojar a los habitantes, fundamentalmente a los residían sobre la zona de La Ribera, esta situación puede observarse en la *Figura 4.3*. Este panorama se replicó en otras localidades ubicadas dentro de la cuenca, como es el caso de Tortugas, Andino y Carcarañá, donde decenas de barrios costeros debieron ser evacuados.



*Figura 4.3. Inundación en La Ribera, Timbúes. (2015).*

Esta crecida fue tan importante, que provocó el corte de distintas vías de circulación ante la creciente amenaza, como es el caso de la Ruta Nacional 34, a la altura de Lucio V. Lopéz, la Ruta Provincial 10, entre Aldao y Andino, la Ruta Provincial 15 en Arteaga, pero sin embargo, la situación más crítica se dió en la ex Ruta Nacional 9, donde, como se puede distinguir en la *Figura 4.4*, el agua sobrepasó el puente ubicado al ingreso de la localidad de Carcarañá, llegando a estar 5 cm por encima del coronamiento de la

calzada y comprometiendo a la estructura del mismo, esto se debió a que la zona se vió afectada no solo por los desbordes del río Carcarañá, sino que se sumaron los efectos de la crecida del arroyo Las Tortugas.



*Figura 4.4. Anegamiento del puente ubicado sobre la ruta 9. (2015).*

Y junto a estas consecuencias, se debe sumar la pérdida de miles de hectáreas de zonas rurales dedicadas al cultivo, alcanzando aproximadamente las 100.000 hectáreas, siendo Sanford, Chabás, Casilda, Los Molinos, Arequito, San José de la Esquina, Bigand, Arminda y Villa Mugheta las localidades más afectadas, en las cuales fue declarada emergencia hídrica y social, producto de lluvias de más de 180 mm, y en donde la afectación rondaba el 40% de la producción de la campaña 2015/2016, siendo especialmente afectada la de trigo. Esto se traduce en importantes pérdidas económicas para la región y sus habitantes.

Durante este año, muchos productores agropecuarios y presidentes comunales reclamaron al ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de Santa Fe y al gobernador de Santa Fe, por la necesidad de ejecución de obras, ya sea canales aliviadores o redes de desagües para la propia comuna.

Otro de los eventos que provocaron importantes daños fue la crecida ocurrida en el año 2007, donde nuevamente se vió afectada la circulación en la ex Ruta Nacional 9, a la que se le sumó la Ruta Nacional 33, en esta ocasión, la presión que ejercía el agua sobre el puente era tal, que la estructura del mismo corría riesgo si las condiciones hídricas no mejoraban. En este año, se produjeron grandes evacuaciones en localidades Alvarez, Cañada de Gómez, San Lorenzo y Timbúes, al haber crecido el nivel de agua hasta alcanzar a las diversas viviendas de los habitantes.

Pero no solo las crecidas del río Carcarañá provocan estos efectos destructivos, el Arroyo Tortugas también ha sido causante de anegamientos importantes, como fue el caso del 2016, donde se puede observar en la *Figura 4.5*, donde la Ruta Nacional 1V09, ex Ruta Nacional 9, debió permanecer cerrada.



*Figura 4.5. Anegamiento ex Ruta Nacional 9. (2016).*

Se puede observar entonces, que en la región se han experimentado numerosos eventos de inundaciones, siendo una de las zonas más afectadas la ex Ruta Nacional 9.

En cuanto a sequías, como puede observarse en el *Anexo 9.1.*, en el año 2018 un gran porcentaje de las localidades de la cuenca fueron declaradas en estado de emergencia agropecuaria, producto de la sequía, extendiéndose hasta el 2023 las consecuencias de la misma, donde muchos productores afrontaron pérdidas económicas.

### **4.3. Contaminación puntual por actividades industriales**

En términos de contaminación, la crecida del 2015 del río Carcarañá provocó desbordes del río en todo su cauce, ocasionando arrastre del agua de piletas de afluentes de frigoríficos, feed lots y desagües cloacales, lo que provocó que el escurrimiento presente una importante carga orgánica y olores desagradables. Sin embargo, no se trata de un caso excepcional, el Carcarañá se encuentra afectado por diversas industrias que vuelcan contaminantes en el mismo, como la industria lechera o la agrónoma, y se suma a esta situación la disposición de residuos en los distintos tramos, donde la situación es tal que los vecinos se autoconvocan para colaborar con la limpieza del mismo. En una continuación futura de este proyecto se puede generar un mapa de fuentes puntuales de contaminación en la CBRC, y luego evaluar la posibilidad de poder simularlo mediante el modelo agro hidrológico.

Un ejemplo de contaminación por parte de una industria de la localidad de Arteaga, tiene lugar en el período 2019-2021, durante el cual volcaba, sin tratamiento previo, efluentes industriales en el Río Carcarañá.



*Figura 4.6. Contaminación industrial en la localidad de Arteaga. (2019-2021).*

Dicha empresa, dedicada a la producción de alimentos balanceados para animales, vertía un fluido con aparente color rojizo, como el que se puede observar en la *Figura 4.6*. El cual fue sujeto de distintas muestras, a partir de las cuales se determinó que existían distintos valores que estaban por fuera de los parámetros establecidos en las normas. Los mismos eran, la coloración rojiza, un elevado valor de demanda química de oxígeno (DQO) y elevado contenido de fósforo. La misma fue clausurada luego de que la Justicia advirtiera el vertido de efluentes contaminantes (tóxicos) en perjuicio de 8 poblaciones próximas al río Carcarañá y el propio curso de agua.

También existe el vuelco de contaminantes sobre el río Tercero, como es el caso de la Central Nuclear Embalse, que debido a las pérdidas en el sistema central, el agua que circula por el río presenta altos niveles de tritio, una forma radioactiva del hidrógeno, que impacta no solo en los peces y plantas, sino que también puede impactar en las futuras generaciones.

#### **4.4. Pérdida de suelo y excedentes hídricos**

##### **4.4.1. Monocultivo de soja**

El monocultivo se trata de un sistema de siembra a gran escala que utiliza grandes extensiones de tierra para cultivar la misma especie, empleando el mismo sistema de riego, pesticidas, fertilizantes, etc. para toda la plantación.

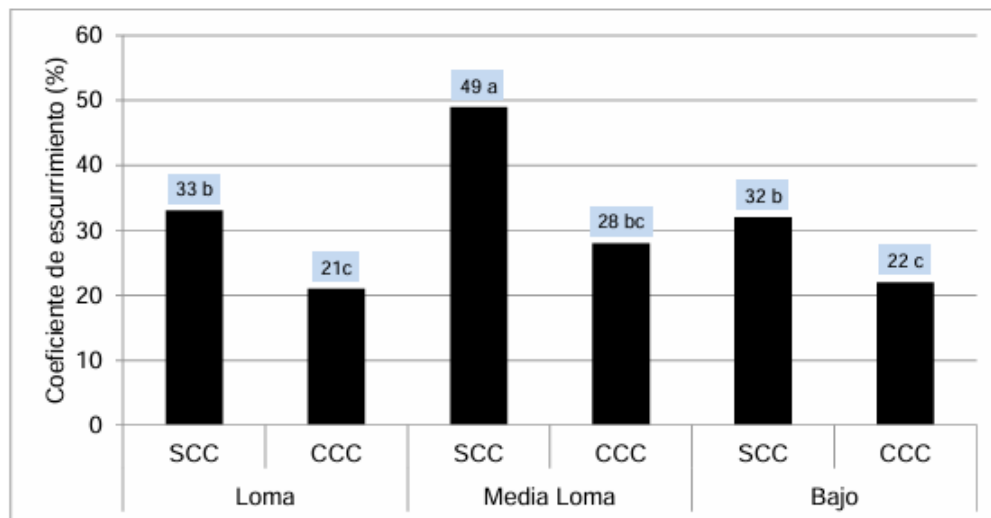
De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGPyA), en la región pampeana, durante el periodo de 1994-2003, se observa un incremento de la superficie dedicada a la soja del 175%, donde a la provincia de Santa Fe le corresponde un 17,5% de este aumento. Sin embargo, la soja no ha desplazado a otros cultivos en su expansión, sino que ha avanzado sobre suelos dedicados a otros usos, como la ganadería.

Esta expansión origina la creación de “desiertos verdes”, qué hace que este cultivo no solo sea perjudicial para el medio ambiente, sino también una amenaza a largo plazo para la agricultura en sí. Esto se debe a que el hecho de cultivar solo uno o dos tipos de plantas sobre vastas extensiones de tierra produce el agotamiento de los nutrientes del suelo, dejándolo débil e incapaz de soportar el crecimiento saludable de las plantas sin agregar cantidades mayores de fertilizantes sintéticos. También, propicia el crecimiento de malas hierbas y plagas que un paisaje con mayor biodiversidad normalmente suprimiría por sí solo, dando lugar a la necesidad de aplicar más y más fuertes productos químicos para combatirla, y reduciendo la productividad del suelo. A su vez, se presenta la problemática de la tala indiscriminada para destinar estas tierras a las plantaciones del cultivo.

La extensión del monocultivo de soja bajo siembra directa, sin implementar cultivos de cobertura, solamente empleando barbecho, produce importantes pérdidas de suelo, a causa de la erosión hídrica provocada por la ausencia de una capa vegetal durante gran parte del año que retenga las precipitaciones, reduzca la velocidad del escurrimiento y favorezca a la reducción del mismo mediante la evapotranspiración. De acuerdo con estudios realizados por el INTA Paraná, a partir de datos recolectados durante más de 50 años en parcelas de escorrentía, el monocultivo de soja pierde aproximadamente un 50% más de agua por escurrimiento al año, en comparación con la rotación maíz-trigo/soja, debido a que, la limitada exploración de raíces en el perfil del suelo y el bajo aporte de residuos sobre la superficie determina la formación de estructuras de suelo desfavorables para la infiltración de agua, incrementando los niveles de escurrimiento superficial, que a su vez, ocasionan mayores pérdidas de nutrientes. Sin embargo, una gran parte de los productores de la región deciden no llevar a cabo estas prácticas de rotación con cultivos de cobertura, por no serles redituables económicamente.

La Ing. Julia Ester Capurro, en su tesis de maestría del año 2018, estudió los efectos sobre las propiedades edáficas y uso del agua al emplear cultivos de cobertura en ambientes con erosión hídrica y monocultivo de

soja, realizando su análisis en la localidad de Cañada de Gómez, Santa Fe. En esta investigación, uno de los parámetros que evaluó fue la variación del coeficiente de escurrimiento que se presentaba en parcelas con cultivo de cobertura, respecto a aquellos sin cultivo de cobertura, presentándose una importante disminución en las primeras en relación con las que no tenían cultivo de cobertura, como se puede observar en la *Figura 4.7*.



*Figura 4.7. Coeficiente de escurrimiento en porcentaje. CE: Coeficiente de escurrimiento; SCC: Sin Cultivos de Cobertura; CCC: Con Cultivos de Cobertura.*

Además, se evaluó la incidencia de la infiltración acumulada, donde se observó que hasta los 10 minutos del inicio de la lluvia, no existía diferencia entre las infiltraciones acumuladas de las distintas parcelas, hasta que en el pulso de 20-25 minutos, se evidenció que todas las parcelas sin cultivo de cobertura habían infiltrado menos agua que aquellas con cultivos de cobertura, con promedio de 22,5 y 24,8 mm respectivamente. Al finalizar el ensayo, las diferencias entre ambas parcelas fueron notorias, con un promedio de 38,7 mm para aquellas sin cultivos de cobertura y de 44,7 mm para las que contaban con los mismos, estos resultados se pueden observar en la *Figura 4.8*.

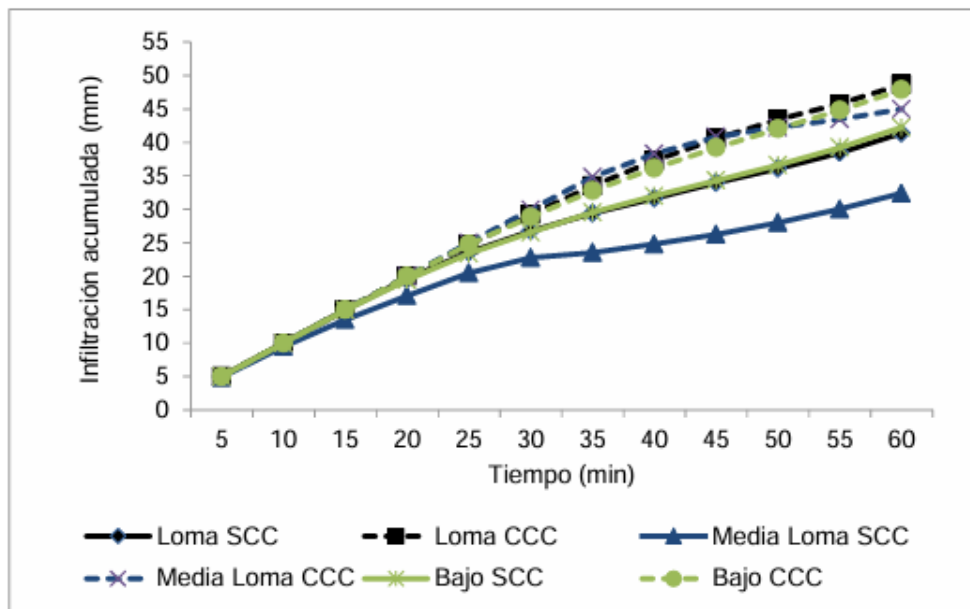


Figura 4.8. Infiltración total acumulada en milímetros. IA: Infiltración total acumulada; SCC: Sin Cultivos de Cobertura; CCC: Con Cultivos de Cobertura.

Estos dos parámetros se relacionan con la pérdida de suelo producida por la erosión hídrica, donde se puede observar en la Figura 4.9, como en aquellos suelos sin cultivos de cobertura, se incrementaron los kilogramos perdidos por hectárea, fundamentalmente en el ambiente de media loma.

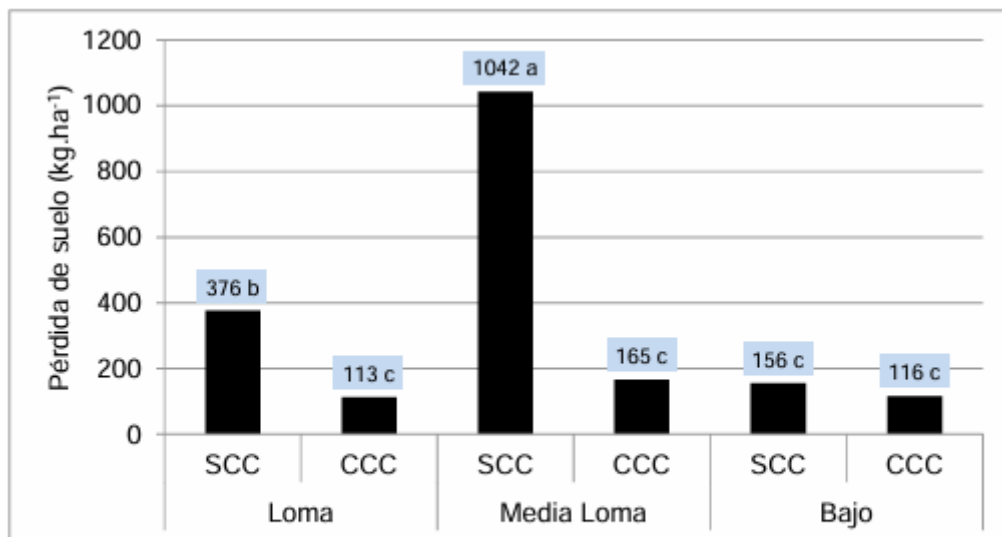


Figura 4.9. Pérdida total del suelo en kilos por hectárea, por erosión hídrica. SCC: Sin Cultivos de Cobertura; CCC: Con Cultivos de Cobertura.

#### 4.4.2. Canalizaciones informales

Debido a la creciente impermeabilización del suelo que provoca el monocultivo de la soja en la región santafesina, los productores agropecuarios se ven en la necesidad de derivar los excedentes hídricos superficiales que se originan en sus campos, que provocan severos daños en sus cultivos, construyendo, para tal fin y sin planificación alguna, canales para el encauzamiento de estos excedentes, alterando la dinámica hídrica superficial de la cuenca. Este problema tiene la particularidad de que, si no se actúa sobre estas obras, las consecuencias y efectos del escurrimiento se van incrementando y acelerando hacia aguas abajo, debido a que el productor que recibe aportes de su vecino aguas arriba, los deriva a los campos ubicados aguas abajo, y así sucesivamente, provocando que en las zonas más bajas, se intensifiquen las inundaciones en periodos lluviosos. Esto es lo que ocurre en la provincia de Santa Fe, quien recibe aportes de 650 obras hídricas ilegales detectadas en la provincia de Córdoba, a la vez que dentro de la misma se encuentran una gran cantidad de estas derivaciones entre localidades aledañas.

Dentro de los contribuyentes de las inundaciones en diversas localidades, uno de los que se reitera con mayor frecuencia es la derivación clandestina de escurrimiento por parte de los productores locales, provocando que aguas abajo se produzcan anegamientos importantes. Muchas localidades se ven afectadas por esta problemática, como ocurre en Sanford, donde en el año 2015, se decidió llevar a cabo la comprobación de canales en distintos campos de la zona, y la erradicación de los mismos, que ocasionaron el colapso de la defensa del pueblo, y provocó que el mismo se encuentre en las condiciones que se observan en la *Figura 4.10*.



*Figura 4.10. Inundación en Sanford. (2015).*

Sin embargo, se precisa de un continuo control de las autoridades estatales para detectar estos canales y interferir sobre ellos, ya que no se trata de un hecho aislado, todos los años se detectan nuevos canales, a través de los cuales los productores derivan el escurrimiento a los campos vecinos, provocando inundaciones en los mismos. Resulta necesaria una adecuada planificación de los recursos superficiales, y estas obras clandestinas modifican la dinámica hídrica de la cuenca, alterando las condiciones del río y las localidades, fundamentalmente en importantes periodos de lluvia. Pero esta situación no afecta únicamente a las localidades que se emplazan dentro de la cuenca, aquellas que se encuentran en las cercanías de la misma sufren importantes inundaciones producto de la derivación de las zonas agropecuarias hacia estos sectores, que, en el estudio de la dinámica superficial de la cuenca, no deberían recibir aportes de la misma. Esto ocurre, por ejemplo, en la localidad de Chabás, donde en el mismo año en el que se dieron las inundaciones en Sanford, más de la mitad de la población sufrió anegamientos, provocando importantes daños en los espacios públicos y vías de comunicación, producto de la erosión provocada por el agua, a lo que se sumó el ingreso de agua a las viviendas e importantes pérdidas en las áreas rurales de la región. También, es destacable mencionar la situación de la localidad de Bustinza, que recibe importantes aportes de los campos ubicados al oeste, y que en este año, producto de una lluvia de aproximadamente 180 mm, las calzadas fueron ocupadas por el agua, como se puede distinguir en la *Figura 4.11*, y gran parte de la población debió ser evacuada, evidenciando que, esta problemática, se hace presente en la actualidad.



*Figura 4.11. Inundación en Bustinza. (2024).*

#### **4.5. Actores gubernamentales y de la sociedad civil que participan de la gestión integrada de la CBRC**

Con el objetivo de promover la gestión coordinada de los recursos hídricos de la región, la elaboración de un plan director de gestión integrada para la cuenca y llevar a cabo acciones conjuntas dirigidas a la resolución de la problemática de inundaciones y sequías que afectan a la cuenca, se conformó en el año 2016 la Comisión Interjurisdiccional de la Cuenca del Río Carcarañá (CIRC), conformada por el gobernador de la provincia de Córdoba, Cdor. Juan Schiaretti, el gobernador de la provincia de Santa Fe, Ing. Roberto Miguel Lifschitz, y el Ministro del Interior, Obras Públicas y Vivienda, Lic. Rogelio Frigerio, siendo los tres actores de Orden Gubernamental Institucional (OGI), particularmente ambos gobernadores son de orden provincial, mientras que el ministro es de orden nacional. El plan director continúa en proceso de elaboración, sentándose los siguientes objetivos particulares:

- Preparar un Inventario completo con la caracterización de cada aspecto (Hídrico, Ambiental, Obras Hidráulicas, Energía, Uso de suelo, Hidro-Geomorfológico, Hidrológico, Meteorológico, Climático, etc.)
- Realizar un diagnóstico ajustado de los problemas hídricos de la Cuenca del Río Carcarañá.
- Plantear esquemas alternativos de soluciones (estructurales y no estructurales) para la atenuación de efectos negativos sobre la cuenca: inundaciones, anegamientos, disponibilidad y calidad del recurso, planificación y gestión, etc.
- Implementar la modelación hidrológica distribuida de la sub-cuenca del Canal San Antonio (Arroyo Tortuga) y de la cuenca del Carcarañá por eventos característicos a definir con las autoridades.

En cuanto a la provincia de Santa Fe, existe la Ley Provincial 9830 - Comités de Cuencas (CC), sancionada el 29 de noviembre de 1985 y publicada en el Boletín Oficial el 10 de Enero de 1986, que actualmente sigue vigente de acuerdo al Sistema Argentino de Información Jurídica (SAIJ) y es de alcance general.

La misma establece la creación de la figura de CC como personas jurídicas de derecho público con el fin de colaborar con las reparticiones de la provincia y contribuir al desarrollo sostenible de los recursos hídricos en áreas específicas del territorio provincial.

#### **Facultades y obligaciones**

De acuerdo al Artículo 2 de la ley.

- Ejecutar trabajos de mantenimiento y conservación de obras existentes para preservar las condiciones de drenaje.
- Ejecutar obras hidráulicas y/o de arte y/o complementarias menores de acuerdo a lo establecido en la presente Ley, con previa aprobación de la autoridad provincial competente.

- Difundir y promover la incorporación de las formas de manejo agrohidrológico adecuadas para la región y preestablecidas por los Organismos competentes.
- Transmitir a los organismos competentes las inquietudes y necesidades relacionadas con sus fines y objetivos.

### **Integración y representación**

De acuerdo al Artículo 3 de la ley, cada CC está integrado por:

- Un representante del organismo de competencia que el Poder Ejecutivo provincial determine, en adelante, a los efectos de este informe, denominado como Orden Gubernamental Institucional Provincial (OGIP).
- Dos delegados titulares y dos suplentes en representación oficial de las autoridades de las comunas y municipios, en adelante denominados como Orden Gubernamental Institucional Local (OGIL).
- Dos delegados titulares y dos suplentes en representación oficial de productores/contribuyentes, en adelante denominados como Sociedad Civil - Actores individuales (SC-AI).

Todas las cuencas enmarcadas en la Ley 9830/1986 presentan esta forma de organización.

### **Estructura de los CC**

Los órganos que constituyen el CC son la Asamblea Plenaria (AP) y el Comité Ejecutivo (CE). La autoridad máxima es la AP, que serán ordinarias y extraordinarias y, cuyas facultades son:

- Designar o remover a los integrantes del CE.
- Aprobar presupuesto y plan de trabajo.
- Aprobar imposición de tributo por hectárea para el financiamiento.
- Autorizar el uso de los recursos financieros.
- Aprobar el balance general y rendición de cuenta anual.
- Las decisiones se toman por el voto de los dos tercios de los miembros presentes.

El CE está integrado por las figuras específicas de Presidente, Vicepresidente, Secretario, Tesorero y el Representante del órgano competente que el Poder Ejecutivo designe. Con 2 años de duración en sus funciones y posibilidad de reelección. Sus facultades y obligaciones son:

- Convocar la AP.

- Elaborar el plan de trabajo y presupuesto.
- Elaborar el proyecto de tributo por hectárea.
- Conformar el balance general y rendición de cuenta anual.
- Elaborar periódicamente un informe de gestión.

### **Financiamiento**

- Tributo por hectárea de beneficiarios.
- Fondos provinciales.
- Subsidios y donaciones.

En conclusión, esta ley aborda la importancia de los Comités de Cuenca como instituciones autónomas con responsabilidades específicas en la coadministración de los recursos hídricos de la provincia de Santa Fe. Actualmente, si bien están conformados los CC, los mismos no terminan de funcionar de la forma adecuada, visualizando una falta de comunicación y organización entre los OGI y las SC, llevando a que cada actor individual decida intervenir en su loteo como una cuenca aislada, sin considerar los efectos sobre los lotes aledaños, principalmente aguas abajo. Es decir, se detecta el abordaje de un problema de cuenca macro, como soluciones locales sin interrelación entre las mismas.

Dentro de la región de análisis, hay 4 grandes comités identificados por el gobierno de Santa Fe, enmarcados en la ley provincial 9830, que presentan la estructura ya mencionada, y se encuentra conformado por las siguientes localidades ubicadas dentro de la cuenca del Río Carcarañá, junto a otras que se encuentran por fuera de este territorio:

- Comité de Cuencas del Río Carcarañá: Conformado por el representante técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (OGIP) y los representantes de las localidades de Armstrong, Bouquet, Montes de Oca, Tortugas, Arequito, Arteaga, Berabevú, Casilda, Chañar Ladeado, Godeken, Los Molino, Los Quirquinchos, San José de la Esquina, Caferatta, Cañada de Ucle, La Chispa, Murphy, Venado Tuerto, Bustinza, Cañada de Gómez, Correa, Lucio V. López, Oliveros, Pueblo Andino, Salto Grande, Villa Eloisa, Gaboto, Aldao, Carcarañá, Luis Palacios, Timbúes, Castelar, Crispi, Landeta, Las Petacas, María Susana, y Piamonte.
- Comité de Cuencas del Arroyo Saladillo: Constituido por el representante técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (OGIP) y los representantes de Acebal, Álvarez,

Arequito, Arminda, Bigand, Bombal, Cañada del Ucle, Carmen, Carmen del Sauce, Casilda, Chabás, Chovet, Coronel Arnold, Coronel Domínguez; Alvear, Firmat, Fuentes, Villa Gobernador Gálvez, Godeken, La Chispa, Los Molinos, Los Quirquinchos, Murphy, Piñero, Pueblo Muñoz, Pujato, Rosario, Sandford, Soldini, Villa Mugueta, Villada y Zavalla.

- Comité de Cuencas del Arroyo Totoras, Canales Salto Grande y Serodino: Integrado por el representante técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (OGIP) y los representantes de Armstrong, Bustinza, Cañada de Gómez, Carrizales, Clason, Correa, La Parejas, Lucio V. López, Montes de Oca, Oliveros, Pueblo Andino, Salto Grande, Serodino, Tortugas y Totoras.
- Comité de Cuencas del Arroyo San Lorenzo: Conformado por el representante técnico del Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente (OGIP) y los representantes de Puerto San Martín, Aldao, Carcaraña, Luís Palacios, Pujato, Ricardone, San Jerónimo Sud, Timbúes, Zavalla, Casilda, Roldán y San Lorenzo.

Y al mismo tiempo se conforman comités de cuenca entre distintas localidades, para afrontar problemas en común, como el Comité de Cuencas de los arroyos Las Estacas y el Chupino: Este comité involucra los departamentos de San Jerónimo, Iriondo y Belgrano y nueve distritos, Díaz, San Genaro, Totoras, Clason, Carrizales, Bustinza, Las Rosas, Las Parejas y Montes de Oca. El mismo fue conformado por presidentes comunales (OGI de ámbito local) y senadores de los distintos departamentos, enmarcados en Sociedades Civiles - Identidades Político-Sociales (SC-IPS).

A su vez, también se realizan agrupaciones entre distintos productores agropecuarios que conforman una organización de la SC, como es el caso de Candelaria Integrada Asociación Civil. Esta asociación cuenta con el asesoramiento del ex-Secretario de Asuntos Hídricos de Santa Fe, Ing. Roberto Porta. En el marco de este Proyecto se realizó una entrevista al Ing. Porta (las preguntas y respuestas se presentan en el *Anexo 9.2.1.*). A continuación se realiza un resumen de dicha entrevista.

El Ing. Porta refiere la creación de la Asociación Civil Candelaria (ACC) al no funcionamiento de un Comité de Cuenca en la región (Arequito, Chabás, Sanford, Los Molinos y Casilda, área que abarca unas 120.000 ha). Son miembros de esta asociación productores y profesionales agropecuarios, así como empresas agropecuarias.

Al comentar sobre los problemas identificados por la ACC, hace referencia principalmente a obras estructurales y a estudios hídricos y programas de alerta, que a su entender no estaría llevando adelante idóneamente la SRH. También menciona la ejecución de canalizaciones de parte de productores, responsabilizando a la SRH como el actor gubernamental que no le pone un límite a este accionar.

A su vez, la ACC presenta propuestas frente a la SRH y a Municipios y Comunas del área que abarca la asociación. Se mencionan también vínculos con INTA Oliveros.

La preocupación central de la ACC es el manejo del agua, particularmente los excesos hídricos, en función de la producción agrícola.

Después de habernos comunicado con el representante de una Asociación Civil, nos pusimos en contacto con funcionarios del Orden Gubernamental Provincial.

Entrevistamos en primera instancia a la Ing. Silvina Martín, encargada del Área de Sistemas de Predicción Hidrológica de la Secretaría de Recursos Hídricos, dependiente del Ministerio de la Provincia.

La entrevista realizada a la Ing. Martín fue transcrita y se encuentra disponible en el *Anexo 9.2.2.*, allí se menciona que existían numerosos puntos de medición en el sur de Santa Fe correspondientes a las cuencas de los Arroyos Saladillo y Ludueña, pero que a partir del año 2019 comenzaron a dejar de funcionar, pasando de contar con 28 estaciones a menos de la mitad en 2024. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con mayor medición de datos en la cuenca del carcarañá, aspecto que antes no existía, lo cual resulta de importancia por la escasa información que se cuenta para la misma, además que se pretende ampliar la cantidad de estaciones pertenecientes a la red de medición. Existen estaciones pluviométricas, hidrométricas y pluvioidrométricas, que brindan datos de precipitaciones y altura de agua, resultando información relevante para productores y actores gubernamentales.

En 2024, a través de una nueva licitación, se instalaron tres estaciones en la Cuenca del Carcarañá: dos en Cañada de Gómez (hidrométrica y pluvioidrométrica) y una en Arteaga (hidrométrica). Además, se encuentra prevista la instalación de una estación pluviométrica en Bouquet, que complementará la estación hidrométrica nacional existente, permitiendo un monitoreo pluvioidrométrico en esa localidad.

También se destaca que no se cuenta con comunicación con la provincia de Córdoba, que podría alertar acerca de eventos que puedan afectar a las localidades de Santa Fe y permitir a los distintos actores tomar prevenciones con mayor anticipación, lo que denota la escasa participación del CC interjurisdiccional creado en 2016, que no se encuentra trabajando adecuadamente.

Otro aspecto relevante, es que no se cuenta con alguna documentación gráfica que represente las áreas de riesgo hídrico o los mapas de zonas inundables a escala de localidades por parte de la SRH, si no que el análisis es más puntual, a escala de lotes. La SRH realiza un análisis de riesgo hídrico a solicitud de propietarios de parcelas, considerando las recurrencias de 20 y 100 años, mientras que el IDESF ha elaborado estudios más generales y cualitativos para la provincia.

En función de la información relevada en las entrevistas al Ing. Porta y a la Ing. Martín, se planteó un nuevo cuestionario para entrevistar al Ing. Raúl Navarro, Sub Director de la Delegación Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe.

En segunda instancia entrevistamos al Ing. Raúl Navarro, Sub Director de la delegación Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe. La entrevista aborda diversos aspectos relevantes sobre el funcionamiento de la SRH y temas que afectan directa o indirectamente a la misma.

La entrevista realizada al Ing. Navarro fue transcrita y se encuentra disponible en el *Anexo 9.2.3.*, se menciona primeramente que el abordaje de una problemática comienza con el reclamo realizado por un Municipio o Comuna, donde los mismos son generalmente problemas de desagüe, inundación o falta/mal estado de una obra hídrica vial. Estas problemáticas deben responder a la Ley de Aguas de la Provincia N° 13.740, donde se especifica el alcance de los estudios necesarios y la documentación a presentar. Luego, las áreas de planificación y proyectos de la Secretaría analizan y evalúan si se encuentra dentro de la planificación del sistema hídrico pensado por la SRH y en caso de ser una temática nueva se analiza desde el punto de vista de los lineamientos generales de la Repartición. Finalmente, si los proyectos son aprobados, continúan un camino interno para su financiamiento.

Otro aspecto importante fue el cómo se abordan las canalizaciones informales por parte de la SRH, donde se indica que primeramente se debe recibir una denuncia por parte de un particular afectado por un aporte de un presunto curso informal el cual genera anegamiento dentro de su predio. Luego, el área del SRH destinada a tratar ésta temática denominada “Unidad de Atención de Procedimiento”, comienza una investigación donde en una primera instancia le solicitará acceso al área del denunciante y se analizarán las causas del problema mediante estudios hidráulicos-hidrológicos que justifiquen la obra denunciada siguiendo la Ley de Aguas antes mencionada. Finalmente, se aplicarán medidas punitivas en caso justificado.

Se señala además que se han realizado múltiples estudios sobre la cuenca del Río Carcarañá, aunque la mayoría son sobre subcuencas que aportan al río. Si bien se realizó un estudio integral para la evaluación del Río Carcarañá como vía navegable, no se mencionan estudios abordando problemáticas hídricas de anegamiento en sectores de riesgo para la misma. Por otro lado, la mayor inversión y estudios realizados sobre cuencas dentro de la región sur de la provincia es la del Ludueña, debido a que afecta a la mayor cantidad de pobladores.

Por último, se abordó la situación actual y las perspectivas futuras de los recursos de la Secretaría. Se destacó la incorporación de nuevas tecnologías como drones para relevamiento topográfico, GPS geodésicos y equipamiento para aforos de caudales, entre otros. Sin embargo, se identificó una escasez de iniciativas destinadas a la capacitación del personal en el uso de estas tecnologías, lo cual obliga a los mismos realizarlo por cuenta propia o interés propio. Asimismo, se hizo hincapié en la necesidad de un plan de recomposición de su planta técnica y una planificación a mediano plazo de sus actividades.

En resumen, se puede evidenciar una clara diferenciación entre cómo plantean la resolución de problemas hídricos, tanto los actores de la Sociedad Civil (SC), como los actores gubernamentales (OGI). Los

primeros, como es el caso de la ACC, buscan una solución estructural a los problemas hídricos, que sea una solución materializable y que la población disfrute de sus beneficios, mientras que los actores de orden gubernamental buscan que las soluciones estructurales sean la última alternativa, enfocándose en aquellas no estructurales en primera instancia, como la aplicación de la Ley de Aguas, la cual muchos miembros de la SC no aceptan como solución válida.

También se menciona en las entrevistas los programas de alerta, donde el actor de la SC da a entender que su funcionamiento no es el adecuado, sin embargo desde el área correspondiente de la SRH cuentan con un sistema de alerta temprano con diversos niveles y con comunicación directa con Defensa Civil.

Otra discusión es el funcionamiento y cantidad de estaciones de medición con las que cuenta la SRH, si bien actualmente existen nuevas estaciones y se prevé la incorporación de otras en distintas localidades, también es cierto lo que remarca el actor de la SC, que en los últimos tiempos muchos equipos fueron deteriorados y puestos fuera de funcionamiento sin su renovación, hasta la actualidad, sobre todo en el periodo 2020-2022.

En cuanto a la problemática de los canales informales, la ACC entiende que es un problema que la SRH debe atender con otro enfoque, ya que la Secretaría atiende aquellas denuncias que se le hace llegar y no realiza un relevamiento o identificación continua de canales, debido a que la gran densidad de estos sobrepasa a la capacidad de la misma, por lo que, busca solucionar estos problemas a través de la Ley de Aguas y la aplicación de medidas punitivas a aquellos que ejecuten los canales.

Finalmente, se observa que la existencia de estas asociaciones civiles, junto a que en diversos comités participa una misma localidad, resulta en muchos casos que, ya sea por conflicto de intereses, o por que los temas de discusión no alcanzan un común acuerdo, que no funcionen adecuadamente estas entidades, o que entre distintos comités existan reclamos por el desagüe de los escurrimientos, es decir, actualmente buscan resolver intereses propios y se evidencia una falta de trabajo en conjunto, tanto intercomités como con las autoridades provinciales.

## 5. Modelo de Simulación Agrohidrológica “Soil and Water Assessment Tool”

### 5.1. Introducción

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ha sido desarrollado por el Grassland, Soil and Water Research Laboratory en Temple (Texas), perteneciente al Servicio de Investigación sobre Agricultura (Agricultural Research Service-ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United Agriculture-USDA).

Se trata de un modelo agrohidrológico conceptual de cuenca, de naturaleza espacial semi distribuida, de tiempo continuo y basado en procesos, que tiene la posibilidad de operar a paso de tiempo diario, desarrollado para evaluar el impacto del manejo y prácticas realizadas en suelos de cuencas de gran extensión. Este modelo es capaz de simular en cuencas agrícolas el transporte de sedimentos, nutrientes, rendimiento agrícola, pesticidas y bacterias, además de la escorrentía superficial. El software divide la cuenca en subcuencas, creando dentro de ellas distintas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) de acuerdo a la información específica que se le provee sobre cobertura superficial, uso del suelo, topografía y tipo de suelo.

El SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir, es conformado a largo plazo, no estando diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado, que utiliza la información climatológica y geofísica, integrando un gran número de parámetros, que hacen parte de las fases cuenca y tránsito, en la primera se emulan procesos tales como la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, pérdida de suelo, flujo subsuperficial, en cambio, los procesos emulados en la segunda fase son los relacionados con el tránsito del flujo o caudal y el tránsito de sedimentos.

Este software presenta los siguientes alcances:

- Definir el manejo de una cuenca, de acuerdo a su potencial productivo y objetivos.
- Estimar variables hidrológicas bajo diferentes escenarios de manejo.
- Determinar el valor de la recarga de acuíferos.
- Valorar la biomasa y rendimiento económico de los cultivos.
- Rastrear los plaguicidas asociados al ciclo hidrológico.

### 5.2. Inputs

Los inputs son las variables de entrada que necesita el modelo para poder realizar el análisis que se le solicita, mientras mayor sea la precisión de estos datos, mejor será la simulación numérica realizada. Entre los inputs más importantes se encuentran:

- *Climate* [Clima]
- *Flow* [Caudal]
- *Soil type* [Tipo de suelo]
- *Basin* [Cuenca]
- *Landuse and management* [Uso y gestión del suelo]

### 5.2.1. Clima

La variable de entrada clima engloba una serie de parámetros de variación diaria, entre ellos se destacan:

- *Precipitation* [Precipitación]
- *Maximum and minimum air temperature* [Temperatura máxima y mínima del aire]
- *Solar radiation* [Radiación solar]
- *Relative humidity* [Humedad relativa]
- *Wind speed* [Velocidad del viento]

En primer lugar, con el objetivo de obtener estos datos, se consulta el Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) del cual se obtiene que en el área de estudio se cuenta únicamente con una estación meteorológica, INTA - Oliveros - 32° 33' 00" S 60° 51' 00" O, *Figura 5.1.*

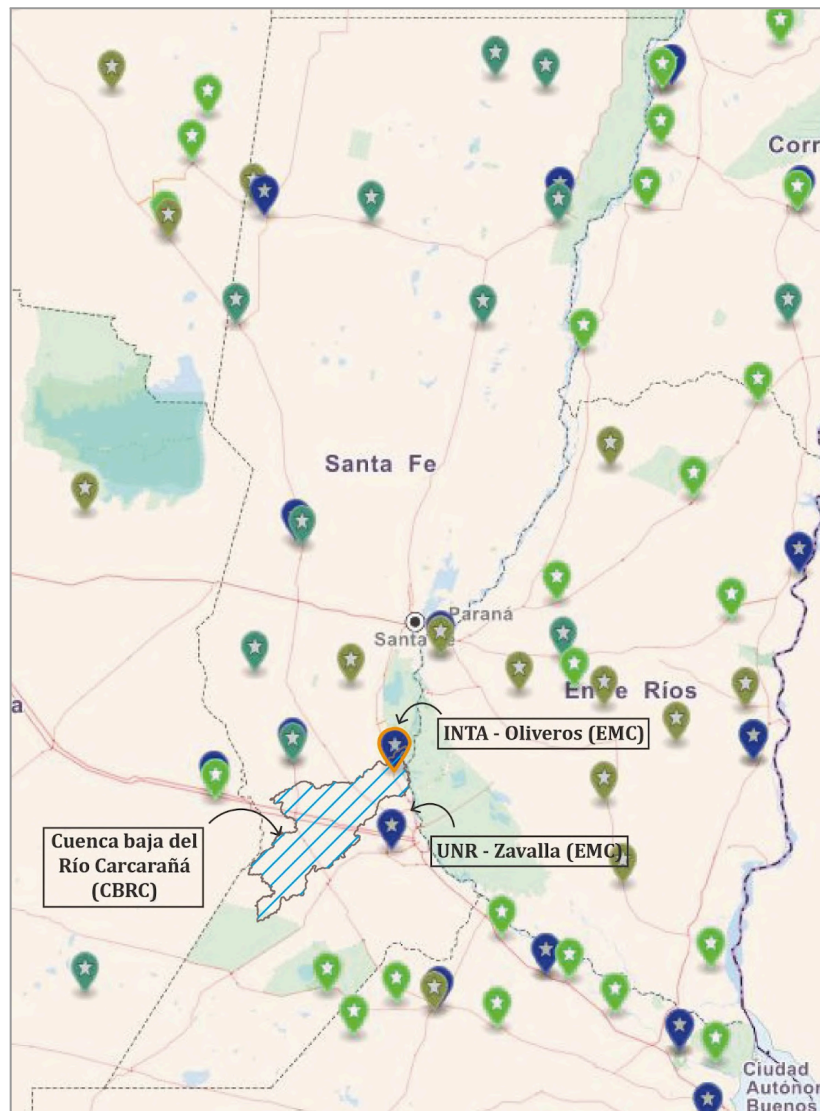


Figura 5.1. Estaciones metereológicas, SIGA - INTA.

También se identifica, la estación UNR - Zavalla - 33° 01' 12" S 60° 52' 48" O, operada por la Universidad de Rosario (UNR), en las cercanías de la cuenca.

De esta forma, se logra comprender la existente escasez de información disponible de datos observados en la zona de estudio.

Como alternativa, de acuerdo a la información brindada por el asesor Ing. Franco Trivisonno, se pueden utilizar sistemas de estimaciones meteorológicas globales, entre los cuales se exploran dos de ellos en el presente informe:

- *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)*
- *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project*

El CFSR desarrollado por los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) de Estados Unidos, es un sistema global de alta resolución conformado por una malla mundial de estaciones meteorológicas “virtuales”, con una resolución de entre 0,25° y 0,50° en latitud y longitud. La serie de datos disponibles en la actualidad se presenta para el período que inicia en enero de 1979 y termina en noviembre de 2017, razón por la cual no fue utilizado, debido a que la opción de POWER cuenta con datos disponibles hasta 2024.

El POWER Project desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), mediante su programa de investigación de Ciencias de la Tierra, es un proyecto de predicción, basado en el estudio del clima y los procesos climáticos, que proporciona una serie de datos meteorológicos y de flujos de energía solar, globales y continuos en el tiempo, a partir de sus sistemas satelitales y modelos.

El mismo organiza los datos según 3 ejes principales: energías renovables, construcciones sostenibles y agroclimatología. Siendo este último seleccionado como de interés para los alcances de este proyecto.

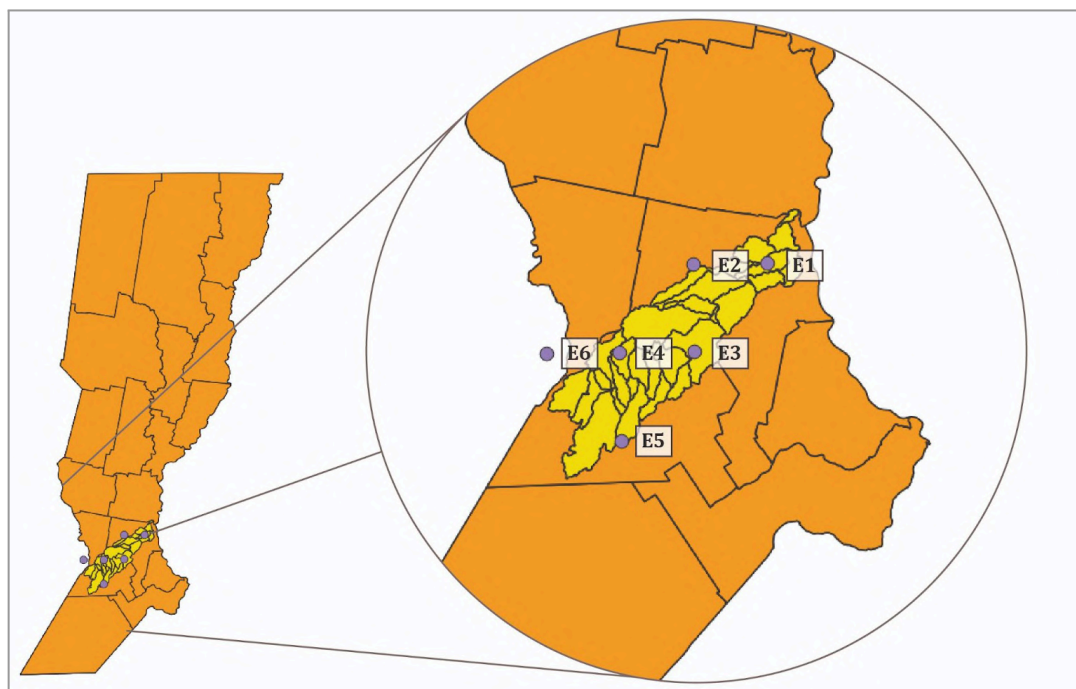
Este proyecto utiliza una cuadrícula global de 1° x 1°, de latitud y longitud, para los parámetros de flujo solar, y de 0,5° x 0,5°, de latitud y longitud, para los parámetros meteorológicos. Los parámetros meteorológicos se basan en los productos del modelo de asimilación Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA-2) de Goddard's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) y en los productos GEOS 5.12.4 en tiempo casi real de GMAO Forward Processing – Instrument Teams (FP-IT).

Para comprensión del lector, se debe destacar que un modelo de asimilación permite realizar el análisis a largo plazo basado en modelos de múltiples conjuntos, realizando un proceso de calibración y validación, mediante datos observados, con el objetivo de representar de la mejor forma posible lo observado, pero siempre dentro de límites que tenga el modelo para predecir.

Por otro lado, también se debe conocer el formato con el cual se debe introducir los parámetros en SWAT: “Archivos CSV con formato SWAT. Encabezado (4 líneas): denominación de las estaciones meteorológicas, seguido de latitud, longitud y elevación de las mismas. A partir de la 5ª línea: fecha en formato juliano (1ª columna), luego los valores de la variable meteorológica correspondiente, para cada estación. A cada subcuenca se le asigna una estación meteorológica en los archivos de entrada de extensión sub” (Arnold et al., 2013).

Debe tenerse en cuenta que el modelo SWAT de la cuenca utilizado en el presente proyecto, es un modelo precedentemente elaborado, el cual cuenta con seis (6) estaciones definidas de forma “virtual” mediante CFSR que sirven de variables de entrada para el período 1993-2015, se deberá respetar la geolocalización de las mismas.

Entonces, el primer paso es definir, en base a los datos entregados por el asesor Ing. Franco Trivisonno, la ubicación de las seis (6) estaciones “virtuales”, *Figura 5.2.* y *Tabla 5.1.*, y el período de complementación de datos.



*Figura 5.2. Estaciones metereológicas virtuales.*

Estaciones virtuales						
Estación:	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Denominación:	p-326-609	p-326-613	p-329-613	p-329-616	p-333-616	p-329-619
Latitud [°]:	-32.6	-32.6	-32.9	-32.9	-33.3	-32.9
Longitud [°]:	-60.9	-61.3	-61.3	-61.6	-61.6	-61.9
Elevación [m]:	13	50	40	101	90	85

Tabla 5.1. Resumen de estaciones virtuales.

```

Station
p-326-609,p-326-613,p-329-613,p-329-616,p-333-616,p-329-619,
Lati -32.6-32.6-32.9-32.9-33.3-32.9
Long -60.9-61.3-61.3-61.6-61.6-61.9
Elev 13 50 40 101 90 85
1979001009.5000.0000.0000.0000.0000.0
1979002000.0009.0000.6002.0000.1003.7
1979003000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979004000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979005000.0000.0000.8002.6005.0006.1
1979006000.0000.0003.9001.3001.3001.0
1979007000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979008000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979009000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979010000.0000.0000.0000.0000.0000.0
1979011000.0000.0000.6000.9000.9007.2
1979012000.0000.0000.5000.7000.8006.3
    
```

Figura 5.3. Ejemplo de formato de archivo con parámetro de precipitación, brindado por Ing. Franco Trivisonno.

En la Figura 5.3. se puede ver como se respeta el formato indicado y la fecha en formato juliano, colocando primero el año y luego el día correspondiente de entre los 365 días del año, configurado como "000". Este archivo sirve de ejemplo para la realización de los archivos propios.

Para poder determinar el período de la serie de datos a considerar, se evaluaron los archivos de ejemplo y se identifica que en los correspondientes a temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento existen valores -99.000, Figura 5.4., lo cual señala que son datos faltantes, y este valor en particular le indica a SWAT que genere ese parámetro para ese día, debido a que el mismo posee un generador climático integrado al modelo.

20142090014	.1420014	.2280014	.0860014	.0920013	.9480014	.095
20142100010	.7940009	.9180009	.1690008	.3260007	.6260008	.028
20142110012	.2810012	.5130012	.6390012	.6860013	.7600012	.828
20142120006	.9720009	.4470008	.3090008	.1280005	.3270008	.506
2014213	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000
	-99.000					
2014214	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000
	-99.000					
2014215	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000
	-99.000					
2014216	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000	-99.000
	-99.000					

Figura 5.4. Ejemplo archivo de parámetro de entrada, brindado por Ing. Franco Trivisonno.

Considerando este último, se decide completar los datos faltantes y utilizar todos los disponibles en NASA Project, respetando como unidad de medida temporal el correspondiente a un año de campaña de cultivo tipo, definido de julio año “i” a junio del año “i+1. Se define así para tener en cuenta los usos y costumbres de la región, donde por lo general se cuenta con período de verano con la cosecha gruesa (principalmente soja y maíz), mientras que en invierno algunos productores siembran y cosechan trigo, y otros siembran algún cultivo de cobertura, por ejemplo avena, veza, etc., para proteger el suelo. De esta forma la campaña fuerte queda totalmente incluida en el período.

Finalmente queda definido el período de análisis desde el 1 de julio de 2014 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2024 (día 182 juliano).

También se debe tener en consideración que SWAT recomienda realizar un “*período de precalentamiento*” en las simulaciones para ajustar las variables internas del modelo hasta que alcancen un estado estable antes de analizar la simulación en el período de interés. Es decir, la necesidad de este período inicial, se da porque al principio de la simulación, las condiciones iniciales del suelo, flujo superficial, flujo subterráneo, clima, etc., no son necesariamente representativas de las condiciones reales del sistema, por lo que SWAT ajusta de forma iterativa las ecuaciones de balance y otras leyes durante ese tiempo, con el objetivo de lograr resultados más representativos en el período de interés.

Con el parámetro *NYSKIP*, se puede configurar el número de años que no se tienen en cuenta en los resultados de salida de la simulación. Para 30 años de simulación, este período es opcional, pero para simulaciones de 5 años o menor, es recomendado. Un período de un (1) año es usualmente adecuado para obtener un ciclo hidrológico completamente operacional (apartado “3.7 Output Information” de la documentación teórica de SWAT [Neitsch et al., 2011]).

Como mínimo, de acuerdo a la documentación teórica, debe ser un año, y su elección también depende de la extensión de la cuenca, de los datos disponibles, etc. Por lo tanto, al tener un período de 10 años, se decide adoptar un “período de precalentamiento” de 4 años para la simulación a realizar. desde el 1 de julio de 2010 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2014 (día 181 juliano), resultando finalmente un período total que abarca del 1 de julio de 2010 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2024 (día 182 juliano).

En resumen:

- *Período de precalentamiento:* 1 de julio de 2010 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2014 (día 181 juliano).
- *Período de análisis:* 1 de julio de 2014 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2024 (día 182 juliano).
- *Período total:* 1 de julio de 2010 (día 182 juliano) al 30 de junio de 2024 (día 182 juliano).

A continuación se explican los pasos a seguir para obtener los datos de cada parámetro, en el período definido, a partir del NASA POWER Project. Se comienza ingresando al visualizador de datos, *Figura 5.5.*, disponible en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.



Figura 5.5. Visualizador de datos, NASA POWER Project.

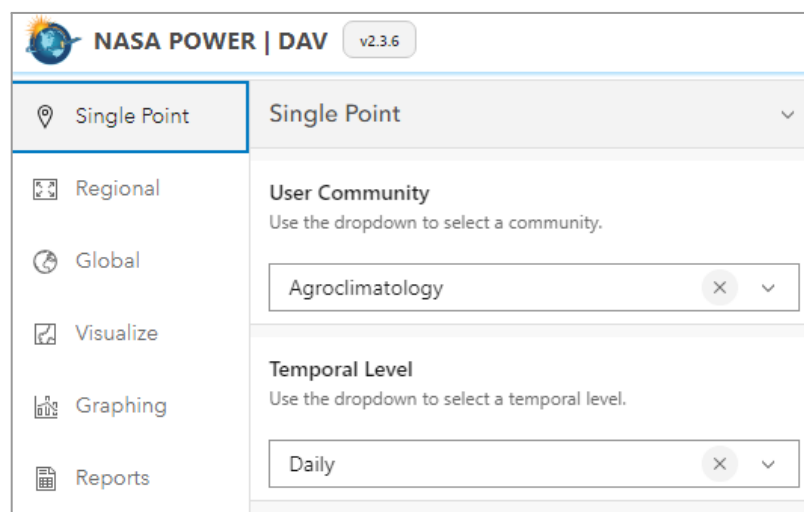
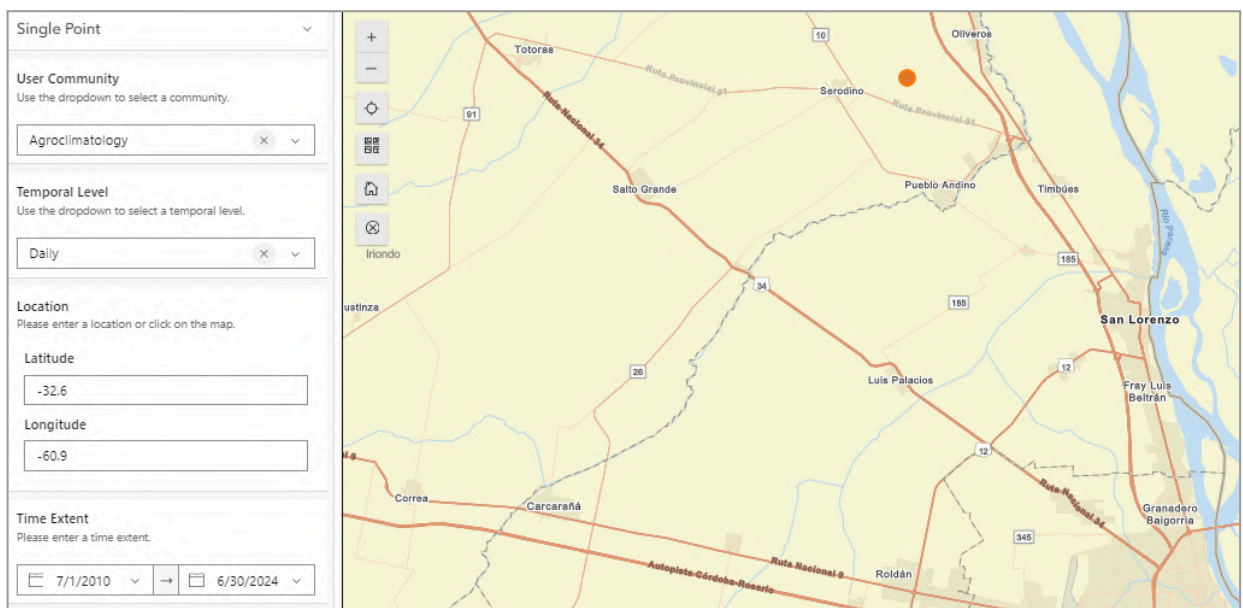


Figura 5.6. Visualizador de datos, NASA POWER Project - Eje y escala temporal.

Luego, como en este trabajo se conocen las ubicaciones de las estaciones “virtuales” se solicita la información disponible en un punto, el cual es de coordenadas conocidas. Como se visualiza en la *Figura 5.6.*, se elige el eje de interés, en este caso *Agroclimatology* [Agroclimatología] y la escala temporal, la cual se ajusta a los alcances de SWAT, por lo cual resulta *Daily* [Diario].

En el paso siguiente se indica la posición de interés, como se puede visualizar en la *Figura 5.7.*, donde se toma como ejemplo la estación denominada como E1, ubicada virtualmente en  $32^{\circ} 36' 00''$  S  $60^{\circ} 54' 00''$  O (Verificando de forma visual en el mapa del visor). También se indica el período de tiempo definido.

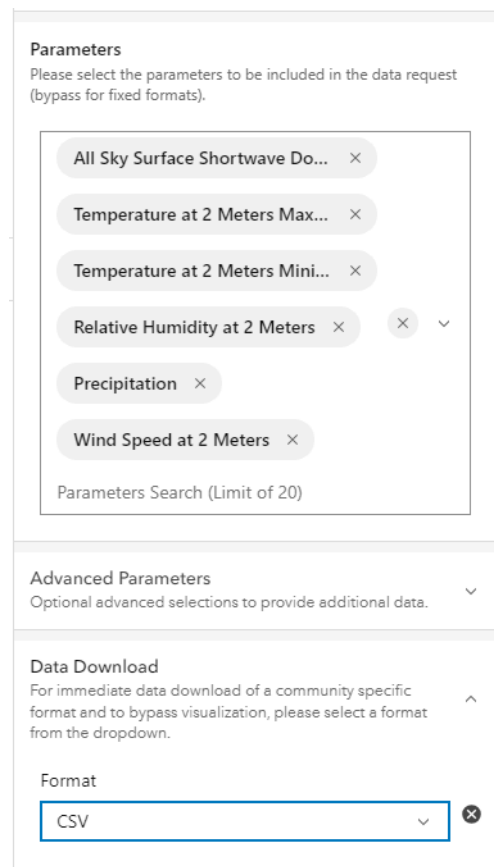


*Figura 5.7. Visualizador de datos, NASA POWER Project - Ubicación y período temporal.*

Por último se indica el formato del archivo a descargar, CSV en este caso, y los parámetros de interés entre una serie de opciones, *Figura 5.8.*, los seleccionados son:

- *All sky surface shortwave downward irradiance* [Irradiación descendente de onda corta en toda la superficie del cielo]: este parámetro fue seleccionado como el más representativo de la radiación solar, debido a que si se selecciona por ejemplo la opción con cielo despejado, es decir sin nubes, la irradiación será mayor. A partir de los valores diarios de este parámetro, SWAT sustrae la radiación de onda corta reflejada, en relación al albedo (relación porcentual entre la cantidad de radiación solar incidente y la cantidad de radiación solar reflejada) y agrega el flujo neto de radiación de onda larga, calculado con la temperatura del aire y coeficientes regionales (apartado "1.1.2.5 Daily net radiation" de la documentación teórica [Neitsch et al., 2011]).
- *Temperature at 2 meters maximum* [Temperatura máxima a dos (2) metros].
- *Temperature at 2 meters minimum* [Temperatura mínima a dos (2) metros].
- *Relative humidity at 2 meters* [Humedad relativa a dos (2) metros].
- *Precipitation* [Precipitación].

- *Wind speed at 2 meters* [Velocidad del viento a dos (2) metros]: seleccionada esta opción, frente a la de diez (10) metros de altitud, debido a que SWAT asume que la velocidad del viento está medida a una altura de 1,70 m de la superficie del suelo (apartado "1:1.4 Wind speed" de la documentación teórica de SWAT [Neitsch et al., 2011]).



The image shows a web interface for selecting parameters and data format. It is divided into three main sections:

- Parameters:** A section titled "Parameters" with the instruction "Please select the parameters to be included in the data request (bypass for fixed formats)". It contains a list of selected parameters in a scrollable container: "All Sky Surface Shortwave Do...", "Temperature at 2 Meters Max...", "Temperature at 2 Meters Mini...", "Relative Humidity at 2 Meters", "Precipitation", and "Wind Speed at 2 Meters". Each parameter has a small 'x' icon to remove it. Below the list is a search bar labeled "Parameters Search (Limit of 20)".
- Advanced Parameters:** A section titled "Advanced Parameters" with the instruction "Optional advanced selections to provide additional data." and a dropdown arrow.
- Data Download:** A section titled "Data Download" with the instruction "For immediate data download of a community specific format and to bypass visualization, please select a format from the dropdown." It features a "Format" dropdown menu currently set to "CSV" with a small 'x' icon to the right.

Figura 5.8. Visualizador de datos, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

Este proceso se sigue para cada una de las 6 estaciones, luego se realiza un procesamiento de los datos para llegar al formato final, terminando en la producción de los siguientes archivos:

- *hmd.hmd* - Representa a la humedad relativa.
- *pcpl.pcp* - Representa a la precipitación.
- *slr.slr* - Representa a la radiación solar.
- *Tmpl.Tmp* - Representa a la temperatura.
- *wnd.wnd* - Representa a la velocidad del viento.

En todos estos archivos la estructura es similar, coincidiendo siempre que las primera cinco filas están destinadas a comentarios, y las primeras dos columnas presentan el día y año con el formato que se muestra en la *Figura 5.3*, la principal diferencia entre cada dato de entrada radica en la cantidad de enteros y decimales con los que se ingresa la información.

Los archivos de humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento mantienen la misma estructura, la cual se presenta en la *Figura 5.9*, donde en cada estación se ingresa el dato diario con cuatro enteros y tres decimales, en orden de izquierda a derecha, es decir que el primer valor luego del día corresponde a la estación E1, el segundo a la E2 y así sucesivamente hasta completar el dato de la estación E6. De esta manera, cada fila contiene seis datos, uno para cada estación, correspondiente a un día del año al que se refiere.

```
Input File hmd.hmd      10/08/2024 ArcSWAT 2012.10_5.21
20101820000.9000000.8840000.8880000.8650000.8740000.865
20101830000.9370000.9280000.9340000.8930000.9110000.893
20101840000.8750000.8890000.9020000.8950000.9040000.895
20101850000.8730000.8830000.8950000.8680000.8810000.868
20101860000.8760000.8480000.8440000.8240000.8140000.824
20101870000.8840000.8710000.8760000.8830000.8910000.883
20101880000.7260000.7010000.7170000.7050000.7080000.705
20101890000.6260000.6070000.6150000.6090000.6050000.609
20101900000.7610000.7310000.7210000.7210000.7090000.721
```

*Figura 5.9. Estructura del input de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.*

Para la temperatura, la estructura se modifica en el ingreso de los datos, donde, como se observa en la *Figura 5.10*, se ingresan las temperaturas máxima y mínimas para cada estación con tres enteros y un solo decimal, donde el primer entero representa únicamente el signo del dato, siendo 0 si la temperatura es positiva o - si se trata de una temperatura bajo cero. En este caso, como se cuenta con dos datos por estación, los mismos se cargan de a pares, es decir, primero la temperatura máxima de la estación E1, luego la mínima de la misma estación, y siguiendo de la misma forma con las restantes estaciones. De esta manera, cada fila contiene doce datos, dos para cada estación, correspondiente a un día del año al que se refiere.

```
2010215010.4-02.6010.3-03.5010.1-04.0010.2-04.1009.6-04.4010.2-04.1
2010216008.8-01.0008.7-00.9008.6-01.4008.7-00.8008.3-00.7008.7-00.8
2010217012.0000.5011.7-00.5011.3-01.3011.2-02.5011.0-03.1011.2-02.5
2010218013.9002.2014.2000.6013.8000.4013.9-00.1013.5-00.6013.9-00.1
2010219014.2005.1014.1003.3014.4003.0014.5002.4014.5002.6014.5002.4
2010220015.6006.5016.0004.8015.9004.7016.2004.8016.2004.4016.2004.8
2010221017.0004.5017.2003.4017.1002.4017.4001.0017.2001.1017.4001.0
2010222018.0004.8018.2003.9018.0004.2018.0002.6017.9002.3018.0002.6
2010223016.4005.1017.3004.5016.4004.4017.6004.6017.1004.6017.6004.6
2010224014.6006.9016.0006.3014.9005.4016.6005.5015.2004.9016.6005.5
```

*Figura 5.10. Estructura del input de temperatura máxima y mínima.*

Por último, la estructura de ingreso de las precipitaciones es muy similar a la que presentan la humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, con la particularidad de que, como se puede observar en la

Figura 5.11, los datos se ingresan con tres enteros y un único decimal, pero la cantidad de datos por fila y la forma en la que estos se ordenan es la misma que los archivos mencionados.

```

Station p-326-609,p-326-613,p-329-613,p-329-616,p-333-616,p-329-619,
Lati -32.6-32.6-32.9-32.9-33.3-32.9
Long -60.9-61.3-61.3-61.6-61.6-61.9
Elev 13 50 40 101 90 85
2010182000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010183000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010184000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010185000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010186000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010187000.0000.2000.0000.7001.2000.0
2010188000.0000.1000.0000.0000.0000.0000.0
2010189000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010190000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
2010191000.0000.0000.0000.0000.0000.0000.0
    
```

Figura 5.11. Estructura del input de precipitación.

Para cada dato de entrada se presentan los distintos ciclos anuales, representado en columnas que se extienden desde el mínimo hasta el máximo valor diario que entrega NASA Power, y se identifican los valores medios mensuales para cada uno de ellos, siendo expresada toda esta información en las tablas adjuntas. La Figura 5.12 y la Tabla 5.2 contienen los datos de radiación solar, la Figura 5.13 y la Tabla 5.3 los de temperatura, la Figura 5.14 y la Tabla 5.4 los datos de humedad relativa, la Figura 5.15 y la Tabla 5.5 los de precipitación y finalmente la Figura 5.16 y la Tabla 5.6 los datos de velocidad del viento.

<i>Resumen radiación solar</i>	
Serie 2010 - 2024 - NASA Power	
Radiación solar máxima [MJ/m <sup>2</sup> /día]:	34.3
Radiación solar mínima [MJ/m <sup>2</sup> /día]:	1.3
Radiación solar media anual [MJ/m <sup>2</sup> /día]:	16.8

Tabla 5.2. Resumen de los datos de radiación solar entregados por NASA Power.

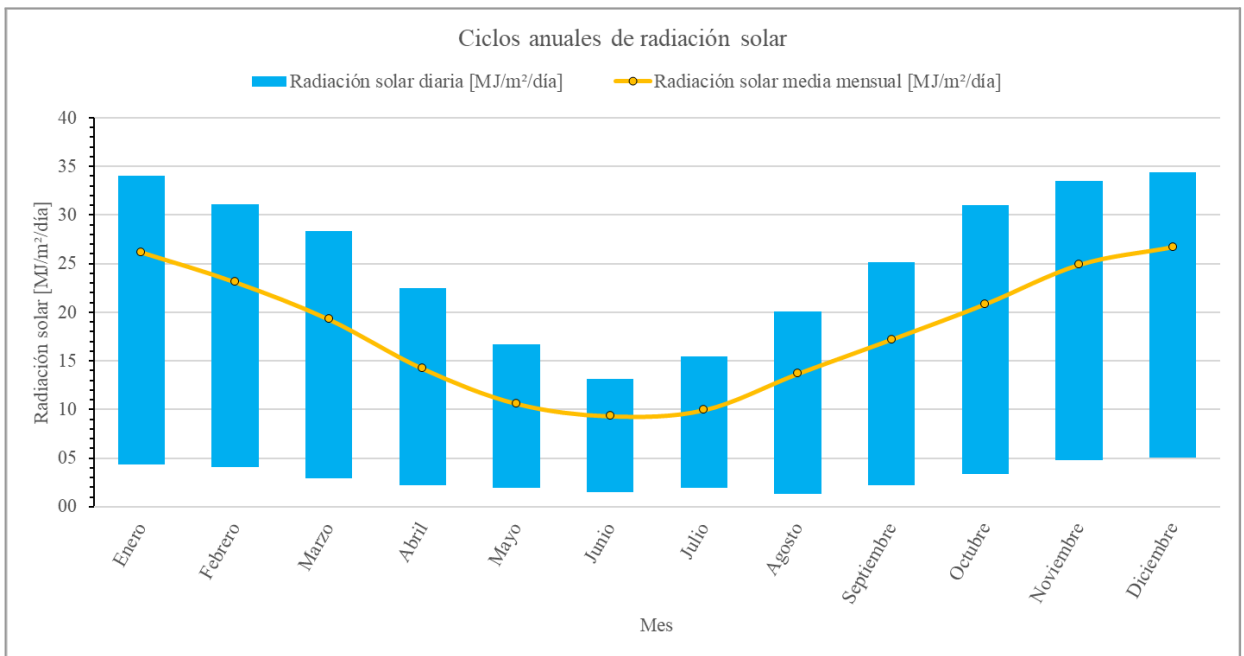


Figura 5.12. Ciclos anuales de Irradiación descendente de onda corta en toda la superficie del cielo, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

Resumen temperatura	
Serie 2010 - 2024 - NASA Power	
Temperatura máxima [°C]:	43.6
Temperatura mínima [°C]:	-4.5
Temperatura media anual [°C]:	17.1

Tabla 5.3. Resumen de los datos de temperatura entregados por NASA Power.

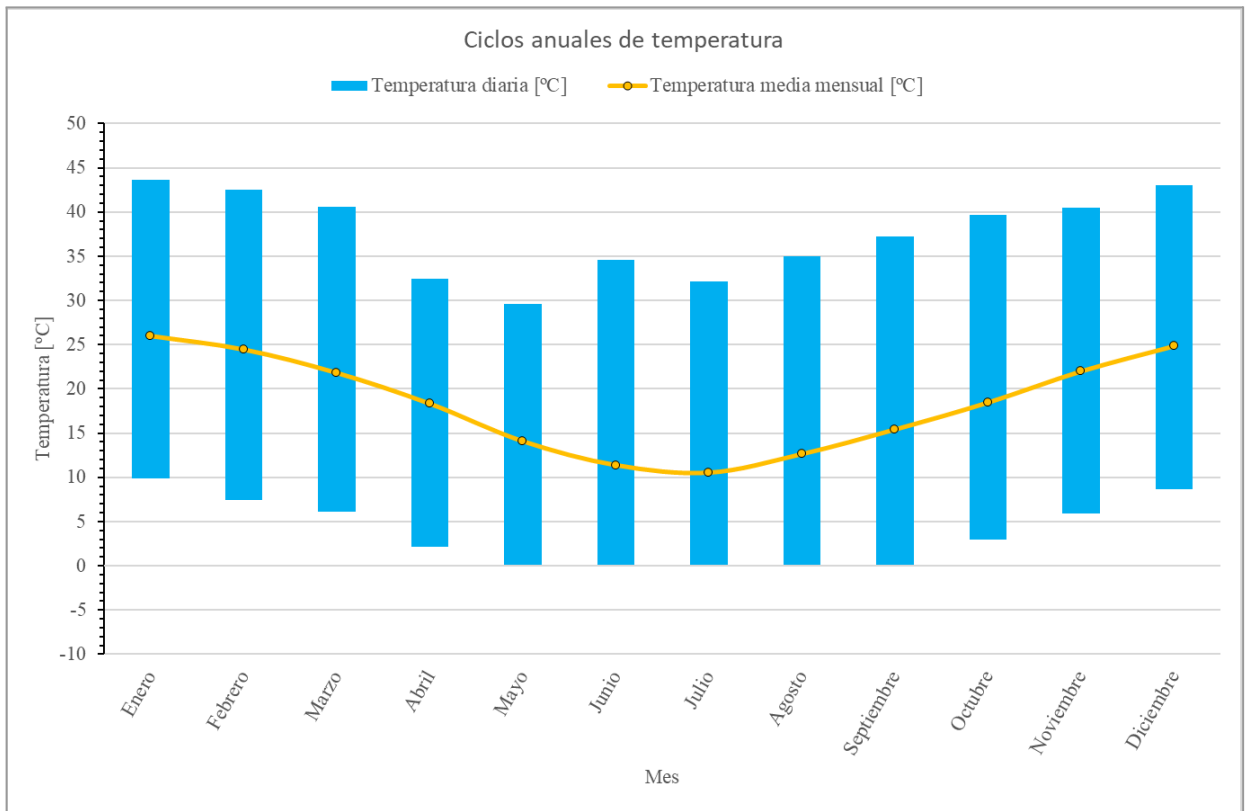


Figura 5.13. Ciclos anuales de Temperatura a 2m, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

En lo que respecta a la temperatura, puede observarse que la temperatura media anual es de 17 °C. Si se compara este valor con lo expresado en el ítem 3.5. *Características climáticas*, donde se hace referencia a una temperatura media anual de 18 °C, resulta apreciable que los datos brindados por NASA Power tienen una buena correlación con la realidad. Esto también se pone en evidencia al observar cómo varían las temperaturas medias mensuales, oscilando en un entorno acotado por los 25 °C y los 10°, y su distribución temporal, similar a las de las Figuras 3.13 y 3.14.

Resumen humedad relativa	
Serie 2010 - 2024 - NASA Power	
Humedad relativa máxima [%]:	96.8
Humedad relativa mínima [%]:	23.8
Humedad relativa media anual [%]:	63.7

Tabla 5.4. Resumen de los datos de humedad relativa entregados por NASA Power.

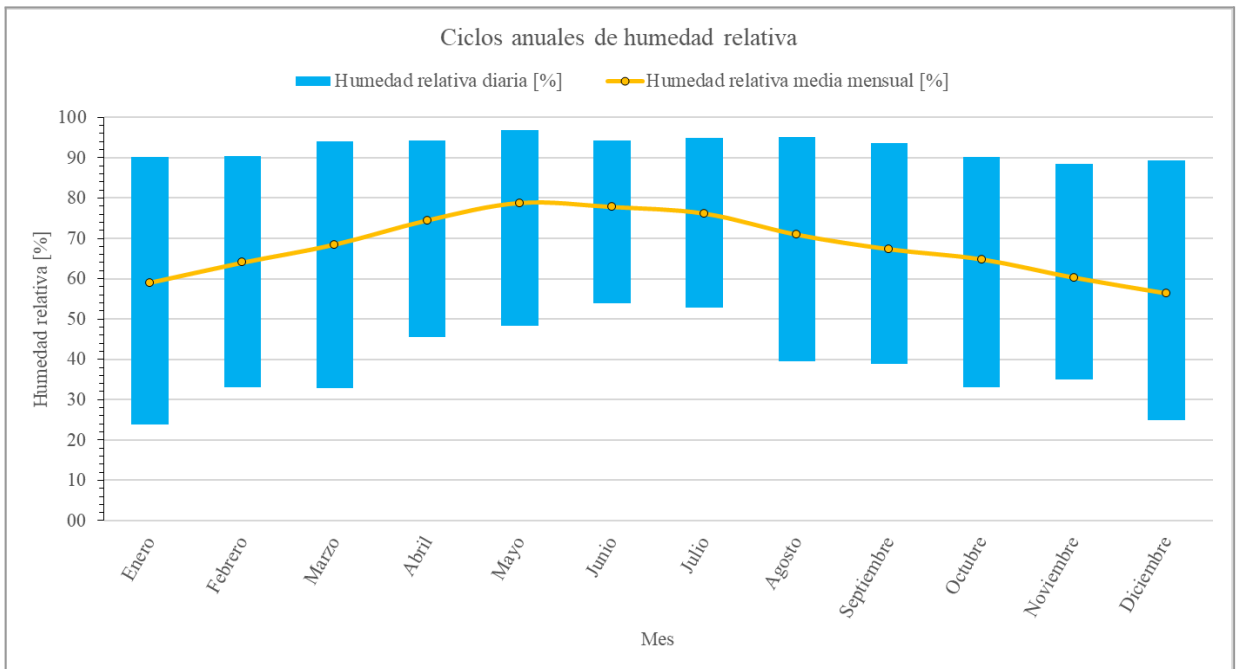


Figura 5.14. Ciclos anuales de Humedad Relativa a 2m, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

<i>Resumen precipitación</i>		
Serie 2010 - 2024 - NASA Power		
Precipitación máxima [mm]:	292.6	2012
Precipitación mínima [mm]:	0.6	2014
Mes más lluvioso [mm]:	115.3	Enero
Mes menos lluvioso [mm]:	16.3	Junio
Módulo pluviométrico [mm]:	930.4	

Tabla 5.5. Resumen de los datos de precipitación entregados por NASA Power.

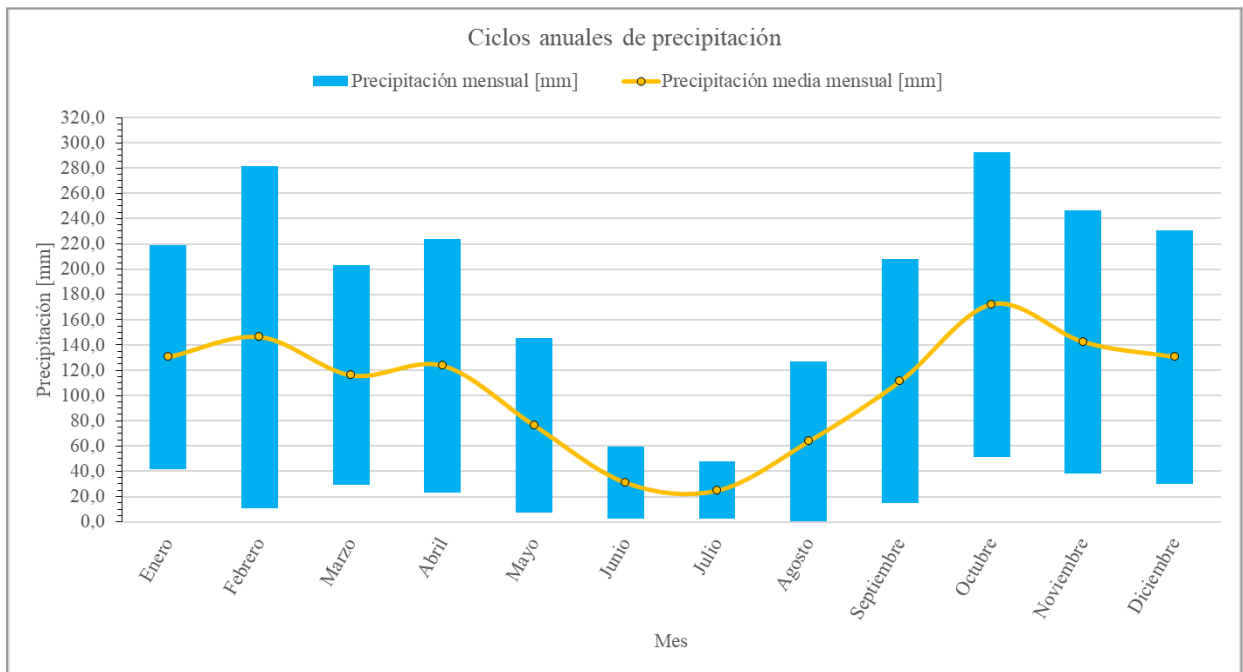


Figura 5.15. Ciclos anuales de Precipitación, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

En cuanto a la precipitación, si se compara con los establecido en el ítem 5.4. *Análisis de precipitaciones*, la precipitación media anual que se obtiene con los datos brindados por NASA se ubica en el entorno de entre 900 mm y 1000 mm que se visualiza en el visor GEO INTA, por lo que, al igual que como ocurre con la serie de datos de temperatura, se puede inferir que la información brindada por NASA Power presenta una buena correlación con la realidad.

<i>Resumen velocidad del viento</i>	
Serie 2010 - 2024 - NASA Power	
velocidad del viento máxima [m/s]:	6.7
velocidad del viento mínima [m/s]:	0.5
velocidad del viento media anual [m/s]:	2.2

Tabla 5.6. Resumen de los datos de precipitación entregados por NASA Power.

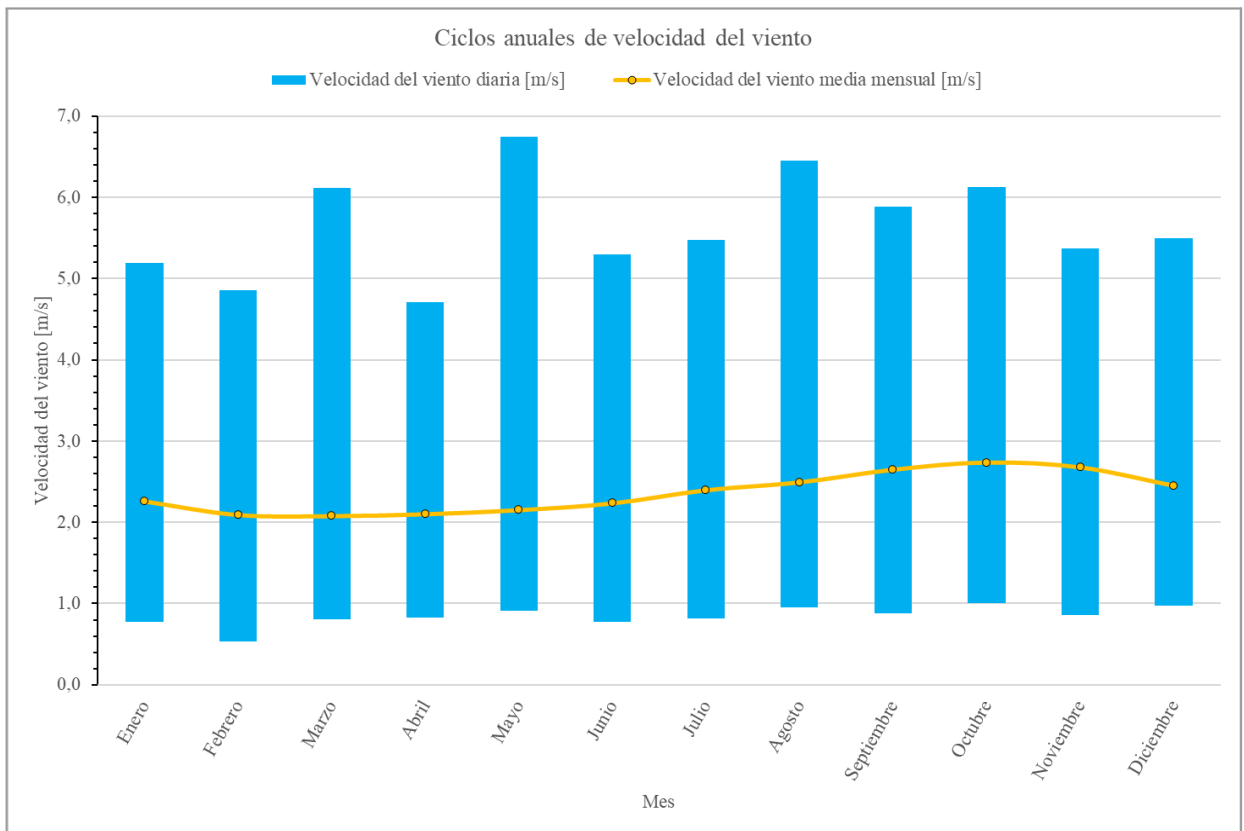


Figura 5.16. Ciclos anuales de Velocidad del Viento a 2m, NASA POWER Project - Parámetros y formato.

### 5.2.2. Ajuste precipitación

Como se indica en el apartado anterior, los datos de precipitaciones, en conjunto con las otras variables meteorológicas de entrada, son provenientes de estaciones “virtuales”, es decir, son datos sintéticos procedentes de datos satelitales y modelos climáticos utilizados en el proyecto NASA POWER. Sin embargo, se destaca la importancia de realizar un ajuste, principalmente de esta variable, debido las siguientes razones:

- SWAT es un modelo predominantemente hidrológico.
- La precipitación es una de las variables de entrada más importantes en el modelo, que tiene incidencia en los parámetros de salidas, principalmente en el escurrimiento y la percolación.
- En la ecuación de balance hídrico, es la variable de entrada al sistema hidrológico frente a la cual reaccionan el resto. La expresión general del balance hídrico anual, considerando una cuenca hidrológicamente aislada, es decir considerando un sistema aislado sin intercambio con el exterior, se puede expresar como:

$$P = ET + A + \Delta S + \Delta H + \Delta G$$

Donde:

- *ET*: Evapotranspiración
- *A*: Escurrimiento superficial

- $\Delta S$ : Variación del almacenamiento superficial
  - $\Delta H$ : Variación de la humedad en el suelo
  - $\Delta G$ : Variación del almacenamiento subterráneo
- Ante la escasez de información de mediciones disponibles en la provincia, la precipitación es la variable que posee la mayor cantidad de datos observados disponibles.

Como también se indica en el ítem precedente, ingresando al Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) se observa que en el área de estudio se cuenta únicamente con una estación meteorológica, INTA - Oliveros - 32° 33' 00" S 60° 51' 00" O, *Figura 5.1*. En dicha estación se encuentra disponible la serie histórica de datos desde el 1 de julio de 1961 al 1 de junio de 2017, *Figura 5.17*.

NOMBRE	INTA - OLIVEROS (EMC)	IDENTIFICACIÓN	NH0472
LOCALIDAD	IRIENDO	PROVINCIA	SANTA FE
TIPO	CONVENCIONAL INSTR. COMPLETO	SERIE HISTÓRICA <small>(AYUDA)</small>	<a href="#">DESCARGAR</a>
ÚLTIMO REGISTRO	01/06/2017	PRIMER REGISTRO	01/07/1961

*Figura 5.17. Obtención de serie histórica de precipitaciones de la estación INTA - Oliveros.*

Esta estación se considera como una estación de confianza debido a que cuenta con una serie histórica cercana a 56 años de valores de diarios de precipitaciones, datos de interés, como así también se debe mencionar la disponibilidad de valores de temperatura, humedad y velocidad del viento, variables que pueden ser objeto de ajuste en un análisis posterior. Por otro lado, es una de las estaciones más importante de INTA y con verificadas contribuciones a la investigación y el desarrollo de tecnologías aplicadas a la agricultura y ganadería en la región. Es por esto que no se realiza, en el desarrollo de este proyecto, un análisis estadístico para los valores de precipitaciones observados en dicha estación, considerándola como de confianza.

A su vez, a través de nuestra directora, la Dra. Ing. Margarita Portapila, se establece contacto con la Ing. Agrónoma Silvina Bacigaluppo, de INTA Oliveros, quien nos facilitó los registros de la Estación meteorológica de Oliveros desde el 01 de enero de 2017 hasta el 30 de septiembre de 2024, lo cual permite completar la serie histórica de INTA Oliveros, utilizando dichos datos, en lugar de las estación virtual más cercana a la misma, E1 de NASA POWER en este caso. Procesada la información, se construyen la serie temporal (*Figura 5.18.*), a modo de resumen *Tabla 5.7.* y el hietograma total (*Figura 5.19.*).

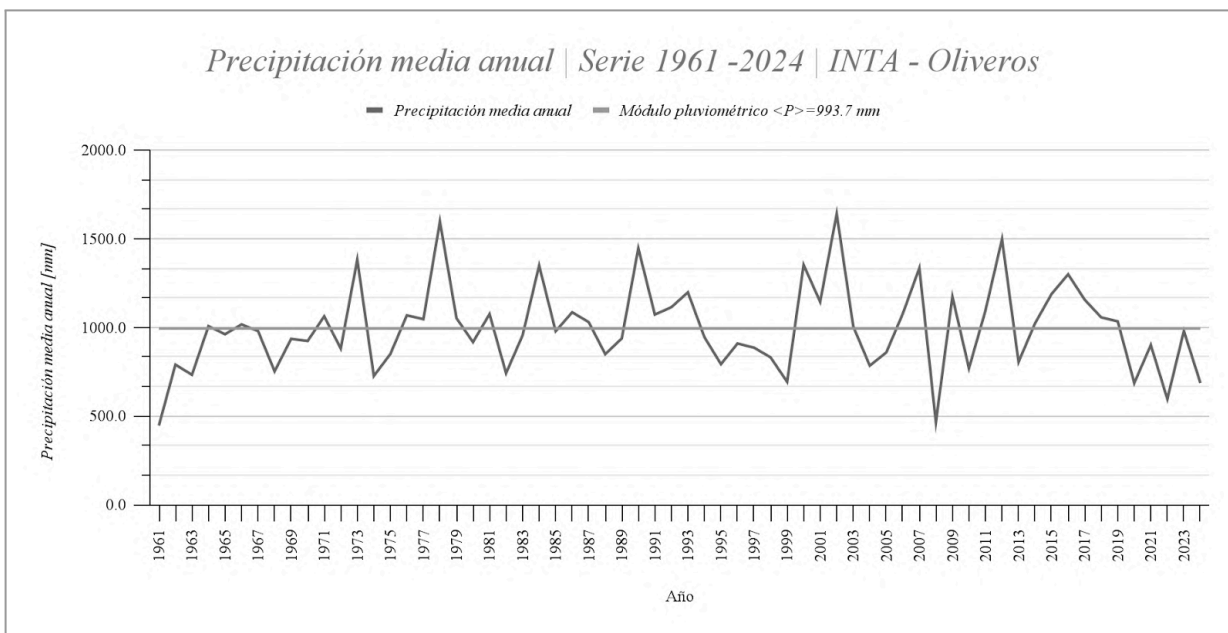


Figura 5.18. Serie temporal de precipitaciones 1961 - 2024, INTA - Oliveros.

<i>INTA - oliveros</i>		
Serie 1961 - 2024		
<i>Precipitación máxima [mm]:</i>	1640.5	2002
<i>Precipitación mínima [mm]:</i>	464.2	2008
<i>Mes más lluvioso [mm]:</i>	141.0	Marzo
<i>Mes menos lluvioso [mm]:</i>	27.7	Julio
<i>Módulo pluviométrico [mm]:</i>	993.7	

Tabla 5.7. Resumen serie de precipitaciones 1961 - 2024, INTA - Oliveros.

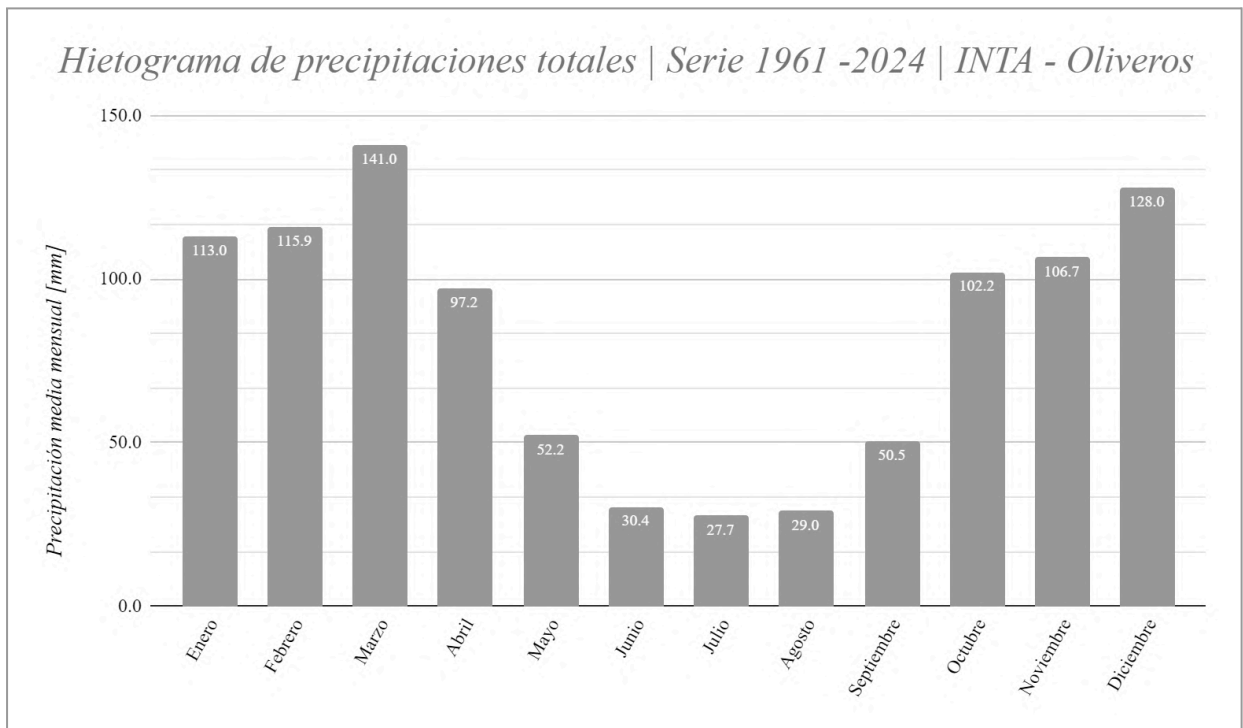


Figura 5.19. Hietograma de precipitaciones totales 1961 - 2024, INTA - Oliveros.

El asesor Ing. Franco Trivisonno nos brindó los datos diarios de precipitaciones correspondientes al establecimiento San Vicente, Cruz Alta. Los mismos fueron otorgados por Ricardo Pozzi, asesor CREA de la región sur de Santa Fe.

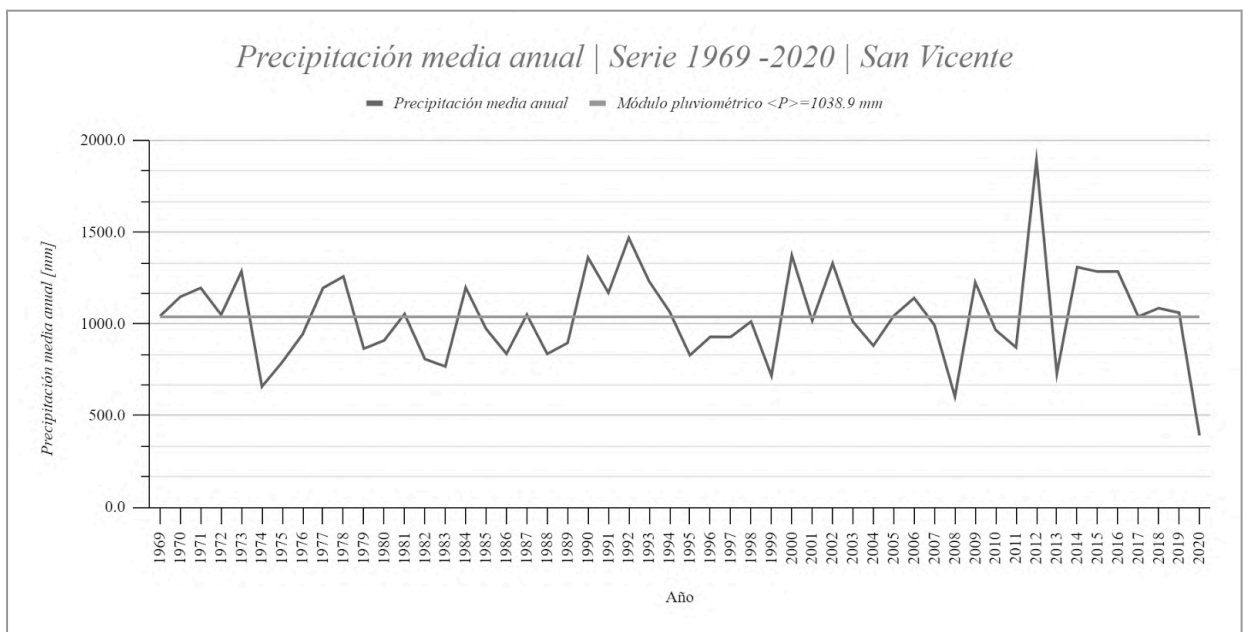


Figura 5.20. Serie temporal de precipitaciones 1969 - 2020, San Vicente - Cruz Alta.

<i>San Vicente - Cruz Alta</i>		
Serie 1969 - 2020		
Precipitación máxima [mm]:	1892.0	2012
Precipitación mínima [mm]:	604.0	2008
Mes más lluvioso [mm]:	140.3	Febrero
Mes menos lluvioso [mm]:	24.9	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	1038.9	

Tabla 5.8. Resumen serie de precipitaciones 1969 - 2020, San Vicente - Cruz Alta.

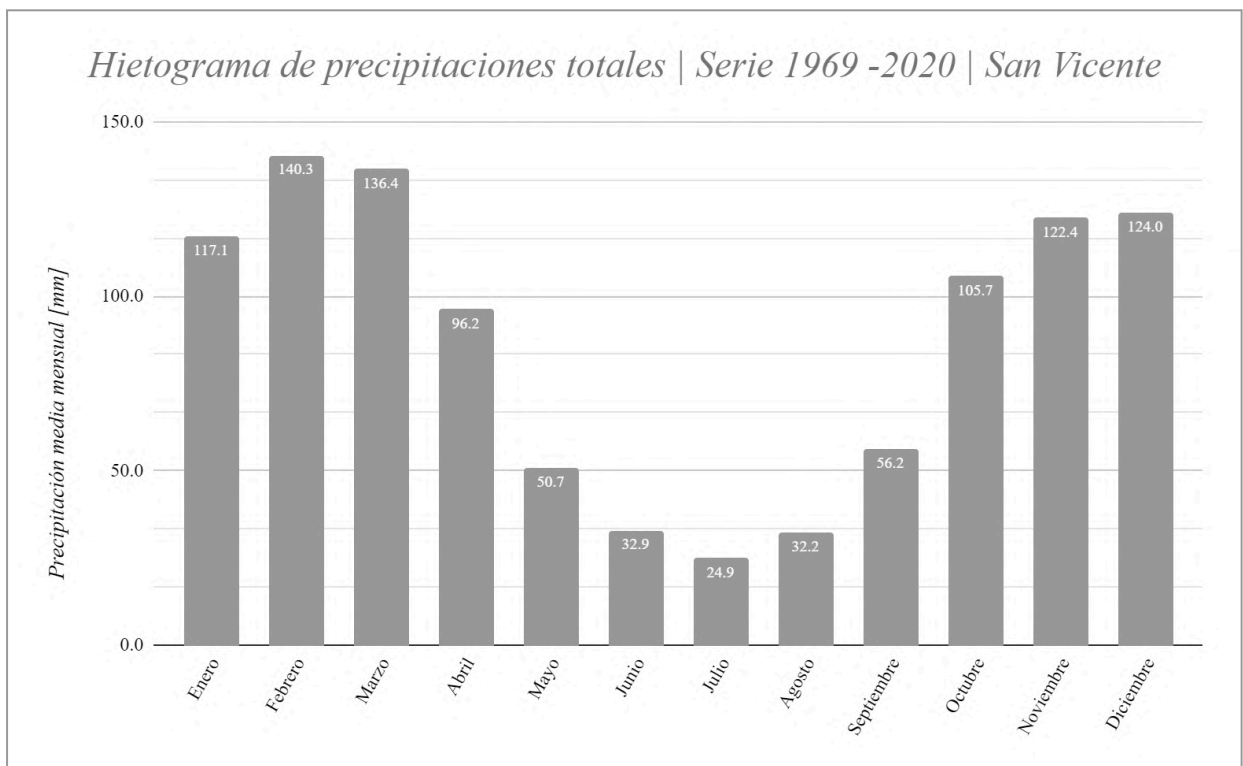


Figura 5.21. Hietograma de precipitaciones totales 1969 - 2020, San Vicente - Cruz Alta.

Nuevamente ingresando al Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en este caso, para la estación meteorológica, UNR - Zavalla - 33° 01' 12" S 60° 52' 48" O, operada por la Universidad de Rosario (UNR), *Figura 5.1*. En dicha estación se encuentra disponible la serie histórica de datos desde el 1 de enero de 1973 al 31 de marzo de 2023, *Figura 5.22*, aunque la misma no es una serie completa, faltan algunos intervalos de datos y por ello en principio se analiza hasta 2013. Además, se debe destacar que si bien esta estación no se encuentra dentro de la cuenca en estudio, la misma es cercana y de confianza, suponiendo que la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es pequeña.

NOMBRE	UNR - ZAVALLA (EMC)	IDENTIFICACIÓN	NH0046
LOCALIDAD	PUAN	PROVINCIA	SANTA FE
TIPO	CONVENCIONAL INSTR. COMPLETO	SERIE HISTÓRICA <a href="#">(AYUDA)</a>	<a href="#">DESCARGAR</a>
ÚLTIMO REGISTRO	31/03/2023	PRIMER REGISTRO	01/01/1973

Figura 5.22. Obtención de serie histórica de precipitaciones de la estación UNR-Zavalla.

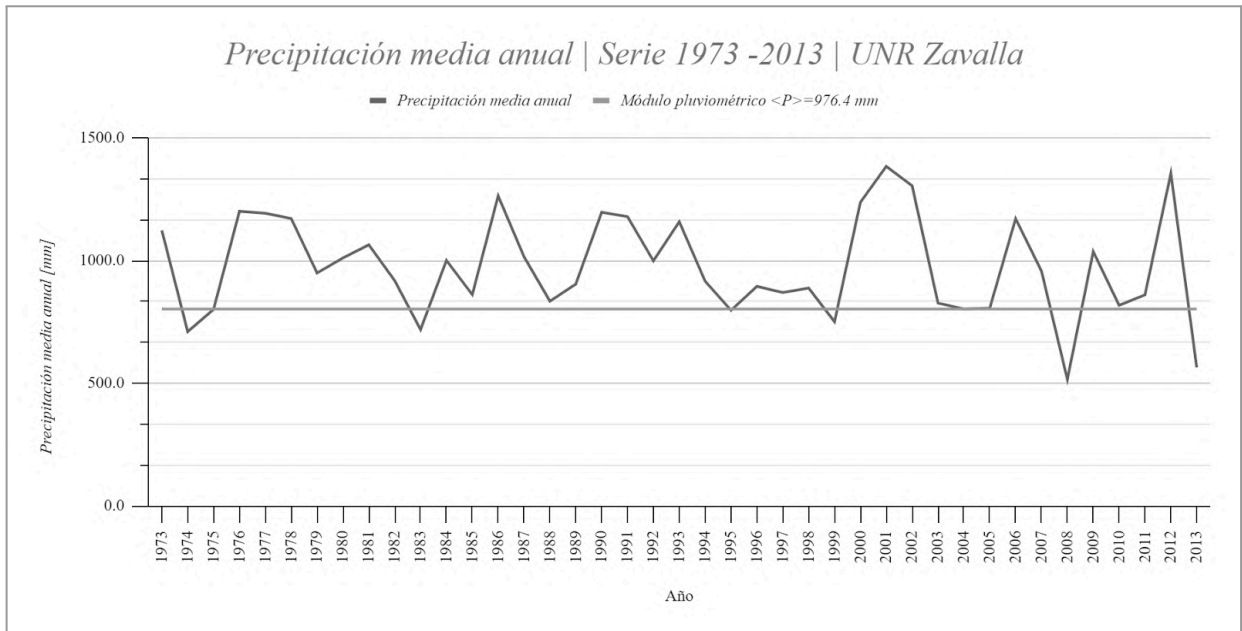


Figura 5.23. Serie temporal de precipitaciones 1973 - 2013, UNR - Zavalla.

UNR - Zavalla		
Serie 1973 - 2013		
Precipitación máxima [mm]:	1384.2	2001
Precipitación mínima [mm]:	515.6	2008
Mes más lluvioso [mm]:	124.9	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	23.8	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	976.4	

Tabla 5.9. Resumen serie de precipitaciones 1973 - 2013, UNR - Zavalla.

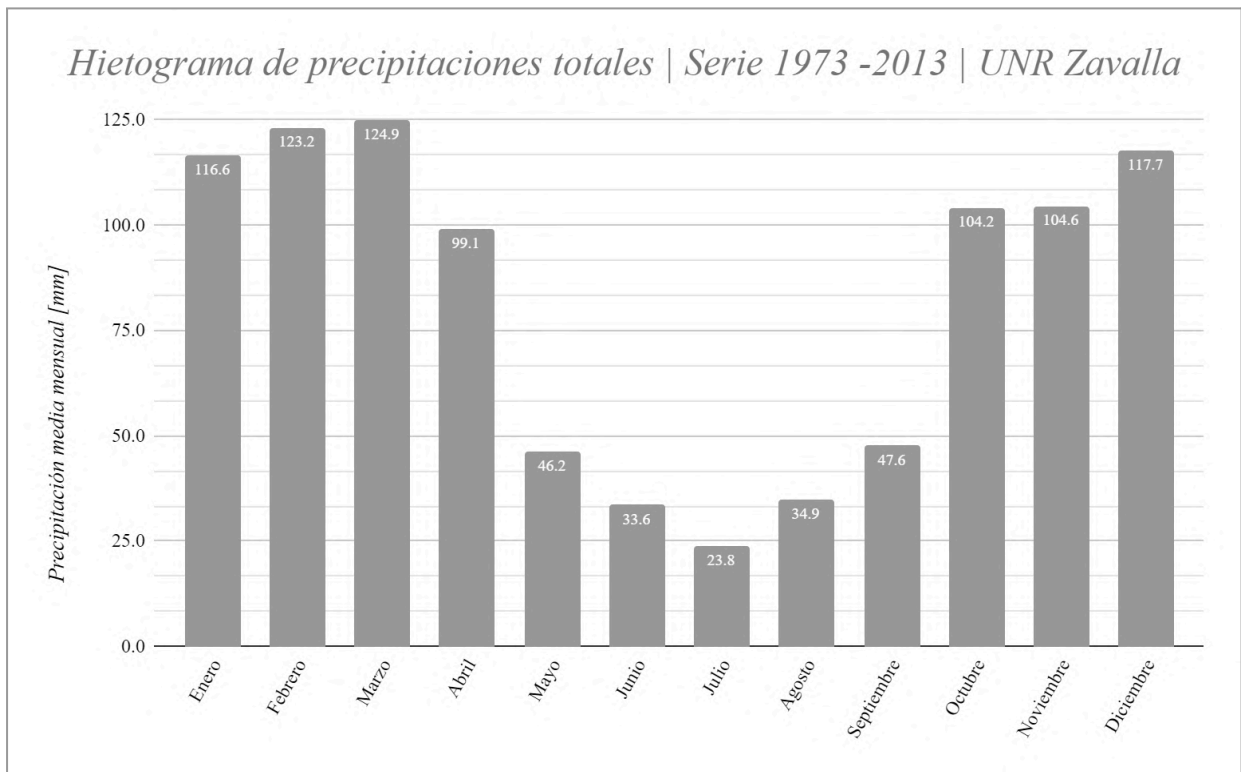


Figura 5.24. Hietograma de precipitaciones totales 1973 - 2013, UNR - Zavalla.

Analizando la *Figura 3.8*, donde se presenta la distribución de las precipitaciones medias anuales en el territorio, se observa que las mismas aumentan a medida que se avanza hacia el este del país, por lo que sería lógico que el módulo pluviométrico obtenido del establecimiento San Vicente sea más bajo que el obtenido en Zavalla y Oliveros. Sin embargo, se observa que este establecimiento presenta una precipitación media anual de 1038,9 mm, frente a los 993,7 mm de Oliveros y los 976,4 mm de Zavalla, por lo que no representa correctamente la realidad, descartando la utilización de esta serie para la estación E6. De manera similar, si acotamos el entorno de los datos al periodo en el que se busca realizar la nueva simulación, es decir 2010-2024, el módulo pluviométrico de la serie que surge de combinar la estación UNR Zavalla, completando los periodos faltantes, con los datos de la estación virtual E3 resulta de 815,8 mm, lo cual es mucho más bajo que incluso la estación E6, la cual se ubica en el extremo oeste de la cuenca, por lo que se decide no emplear este método de combinación de dos estaciones si no emplear únicamente la estación virtual E3, que cuenta con la totalidad de datos para el periodo a simular. En la *Tabla 5.10* se presenta un resumen de las precipitaciones medias anuales para cada estación, incluida la que se obtendría de llevar a cabo la combinación de estaciones en E3. Se observa también la particularidad de que las estaciones virtuales E4 y E6 presentan el mismo módulo pluviométrico, esto es debido a que NASA POWER presenta una grilla de 0,5° x 0,5°, de latitud y longitud, para los parámetros meteorológicos, es decir, E4 se encuentra en el mismo cuadrante que E6, por lo cual se da por válido.

<i>Módulo pluviométrico por estación [mm]</i>	
Serie 2010 - 2024	
E1	947.9
E2	942
E3 (Solo NASA)	936.4
E3 (Zavalla + NASA)	815.8
E4	899.1
E5	918.4
E6	899.1

Tabla 5.10. Precipitación media anual por estación.

A continuación se presenta en *Tabla 5.11.* el resumen de los datos observados de precipitaciones con los cuales se cuenta, y cantidad e intervalos de los faltantes.

<i>Estaciones medidas - Período 01/01/1973 a 30/06/2024 (18,808 días)</i>								
Estación	Datos observados		Datos faltantes		Período datos faltantes			
	Nº datos	%	Nº datos	%	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Oliveros	18,808	100.00%	0	0.00%	-		-	
Zavalla	17,041	90.61%	1767	9.39%	03/02/2014	02/02/2015	01/09/2016(*)	30/06/2024(*)
San Vicente	17,410	92.57%	1398	7.43%	01/09/2020	30/06/2024	-	
Sintéticas	18,808	100.00%	0	0.00%	-		-	

(\*) Se detectaron distintos intervalos con datos faltantes entre esas fechas, 01/09/2016 a 01/07/2018, 25/12/2019, 10/03/2020 a 15/03/2020, 19/03/2020 a 01/12/2020, 17/12/2020 a 29/12/2020, 12/02/2021 a 15/02/2021, 25/12/2021, 01/01/2022, 25/12/2022, 01/01/2023, 31/03/2023 a 30/06/2024

Tabla 5.11. Resumen de datos observados de precipitaciones faltantes.

En síntesis se finalmente se cuenta con:

- E1 virtual es reemplazada por completo por los datos observados de INTA-Oliveros.
- E2, E3, E4, E5 y E6, se utiliza como base la serie de datos sintéticos obtenidos con NASA POWER para cada una de las estaciones.

Para comparar entre el uso de datos climáticos globales mediante el uso de estaciones virtuales, NASA POWER en el alcance de este proyecto, y datos observados en estaciones cercanas, se utilizan los métodos de Dobles Acumulaciones y Test "U" para analizar la consistencia y homogeneidad de los datos, y para cuantificar el error, las métricas de ajuste  $R^2$ , RMSE y NS.

El coeficiente de determinación  $R^2$  es un estadístico que describe la proporción de la variabilidad total en los datos observados, varía entre 0 y 1.

- $R^2 = 1$ , no hay varianza del error, ajuste perfecto.
- $R^2 > 0,7$ , poca varianza del error, se consideran aceptables.
- $R^2 = 0$ , no existe ninguna precisión.

$$R^2 = \frac{\sigma^2_{xy}}{\sigma^2_x \sigma^2_y}$$

Donde:

- $\sigma_{xy}$ : Covarianza de  $x$ ,  $y$ .
- $\sigma_x$ : Desviación de la variable  $x$ .
- $\sigma_y$ : Desviación de la variable  $y$ .

La raíz cuadrada media del error (RMSE) representa la desviación estándar de la muestra de las diferencias entre los valores calculados y los valores observados.

- $RMSE = 0$ , indica un ajuste perfecto entre los valores observados y los calculados, no hay error.
- $RMSE > 0$ , valores más altos indican un mayor error en las predicciones. Cuanto mayor es el RMSE, peor es el ajuste del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y)^2}{n}}$$

Donde:

- $\hat{y}_t$ : Valores observados.
- $y$ : Valores calculados.
- $n$ : número de datos analizados.

El coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe (NS) es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970). Indica que tan bien se correlacionan los datos observados con los datos calculados en un ajuste lineal.

- $NS = 1$ , el modelo es perfecto.
- $NS > 0$ , niveles aceptables de rendimiento.

- $NS = 0$ , el modelo predice con la misma precisión que la media de los valores observados.
- $NS < 0$ , el modelo es menos preciso que simplemente usar la media de los datos observados como predicción, lo cual indica un rendimiento inaceptable.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y_m)^2}$$

Donde:

- $\hat{y}_t$ : Valores observados.
- $y$ : Valores calculados.
- $y_m$ : Promedio de los valores observados.

<i>Estadísticos de medición del ajuste INTA Oliveros - E1</i>			
Métricas		U-test	
Tendencia DA	$y = x + 99.000000$	U	1022
R <sup>2</sup>	1.00	Z	1.28
p-valor	0.97	Z $\alpha$ (95%)	1.96
RMSE [mm]	8.2	Verifica $Z < Z\alpha$	

Tabla 5.12. Estadísticos de ajuste INTA Oliveros - E1.

<i>Estadísticos de medición del ajuste UNR Zavalla - E3</i>			
Métricas		U-test	
Tendencia DA	$y = x + 51.400000$	U	753
R <sup>2</sup>	1.00	Z	1.15
p-valor	0.98	Z $\alpha$ (95%)	1.96
RMSE [mm]	10.5	Verifica $Z < Z\alpha$	

Tabla 5.13. Estadísticos de ajuste UNR Zavalla - E3.

<i>Estadísticos de medición del ajuste San Vicente - E6</i>			
Métricas		U-test	
Tendencia DA	$y = x + 61.800000$	U	871
R <sup>2</sup>	1.00	Z	1.71
p-valor	0.98	Z $\alpha$ (95%)	1.96
RMSE [mm]	18.0	Verifica $Z < Z\alpha$	

Tabla 5.14. Estadísticos de ajuste San Vicente - E6.

Analizando las Tablas 5.12, 5.13 y 5.14, de forma general para las tres comparaciones realizadas se puede concluir que se verificó que no existen eventuales cambios en los datos de las estaciones virtuales, donde la

tendencia central, con el método Test “U”, se obtiene que Z resulta menor a  $Z(\alpha)=1.96$  (Nivel de confianza = 95%) por lo que se puede considerar que los valores adaptados contienen un nivel elevado de confiabilidad. En todas, la tendencia es lineal y el estadístico  $R^2$  no muestra varianza del error. Luego, el p-valor cercano a 1 está indicando también que no existen diferencias significativas entre los datos observados y los simulados en las estaciones virtuales. Por último, el error relativo promedio entre INTA-Oliveros y E1 es 8,2 mm, lo cual con respecto al módulo pluviométrico 993,7 mm de la estación observada, implica un error del 0,83%, nada significativo, totalmente aceptable. Luego entre UNR-Zavalla y E3, el error es 10,5 mm respecto al módulo pluviométrico de 976,4 mm, siendo un 1,07%, nada significativos, es aceptable, y entre San Vicente y E6, es de 18,0 mm, respecto al 1038.9 mm de módulo, siendo un error de 1,73%, el cual, si bien se considera aceptable, representa un error de aproximadamente el doble en comparación con las otras dos estaciones de datos observados, por lo que se justifica, junto a lo mencionado previamente acerca del módulo pluviométrico, descartar la utilización de esta serie. Cabe aclarar que el análisis del error se realiza en el periodo que va desde el 1 de enero de 1981 hasta el primer dato faltante de cada serie.

De acuerdo a Gusmerotti et al. (2024), se estudia el uso de NASA POWER para poder estimar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en el sudeste de Córdoba, donde la falta de estaciones meteorológicas limita la disponibilidad de datos. Comparando las estimaciones de NASA POWER con dos estaciones locales mediante el modelo Penman-Monteith, los resultados muestran una alta correlación ( $R^2 \approx 0.90$ ) y errores menores a 1 mm/día. A pesar de una tendencia a sobreestimar en verano, concluyendo que NASA POWER es útil para estimar la ET<sub>o</sub> en áreas con escasa información, siendo especialmente preciso en primavera y otoño. Esto lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión hídrica y agrícola.

Se incluye el párrafo anterior, para demostrar la existencias de estudios antecedentes sobre el uso de datos sintéticos, NASA POWER en este caso, demostrando el nivel aceptable de los mismos, siendo una herramienta de importancia a tener en cuenta cuando no existen estaciones, o son pocas, dentro del área en estudio, como el caso de la cuenca baja del Río Carcarañá.

Finalmente, se presenta en los siguientes recursos gráficos las series de precipitaciones ingresadas para cada estación.

- *Tabla 5.15 y Figuras 5.25 y 5.26* serie de precipitación para E1.
- *Tabla 5.16 y Figuras 5.27 y 5.28* serie de precipitación para E2.
- *Tabla 5.17 y Figuras 5.29 y 5.30* serie de precipitación para E3.
- *Tabla 5.18 y Figuras 5.31 y 5.32* serie de precipitación para E4.
- *Tabla 5.19 y Figuras 5.33 y 5.34* serie de precipitación para E5.
- *Tabla 5.20 y Figuras 5.35 y 5.36* serie de precipitación para E6.

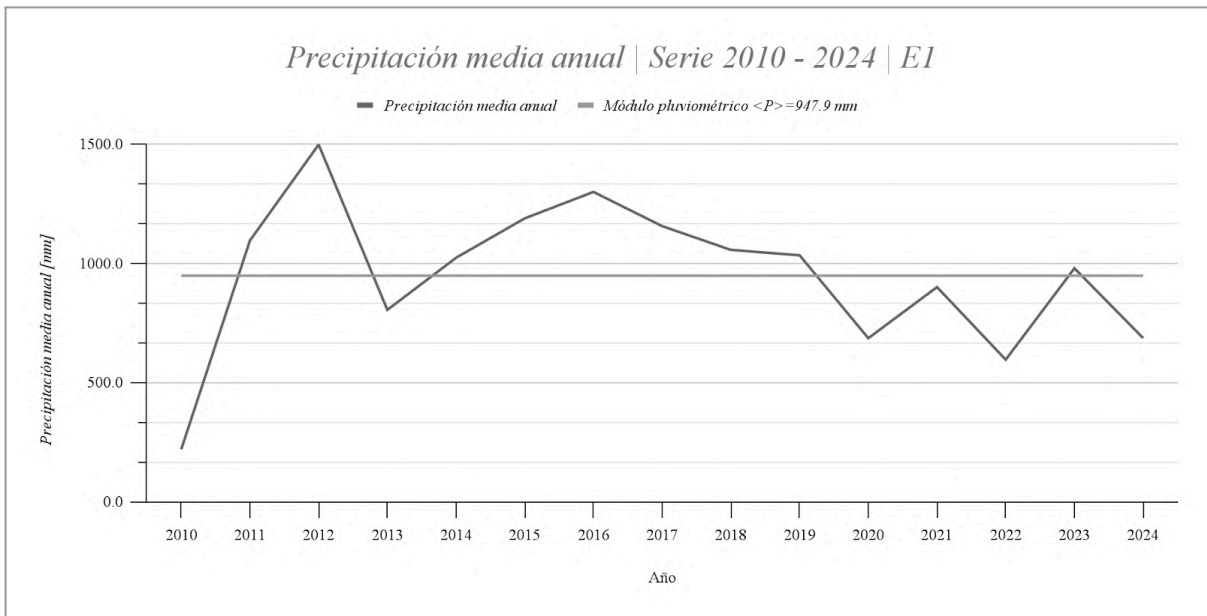


Figura 5.25. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E1.

<i>E1</i>		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1497.7	2012
Precipitación mínima [mm]:	595.5	2022
Mes más lluvioso [mm]:	123.3	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	21.0	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	947.9	

Tabla 5.15. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E1.

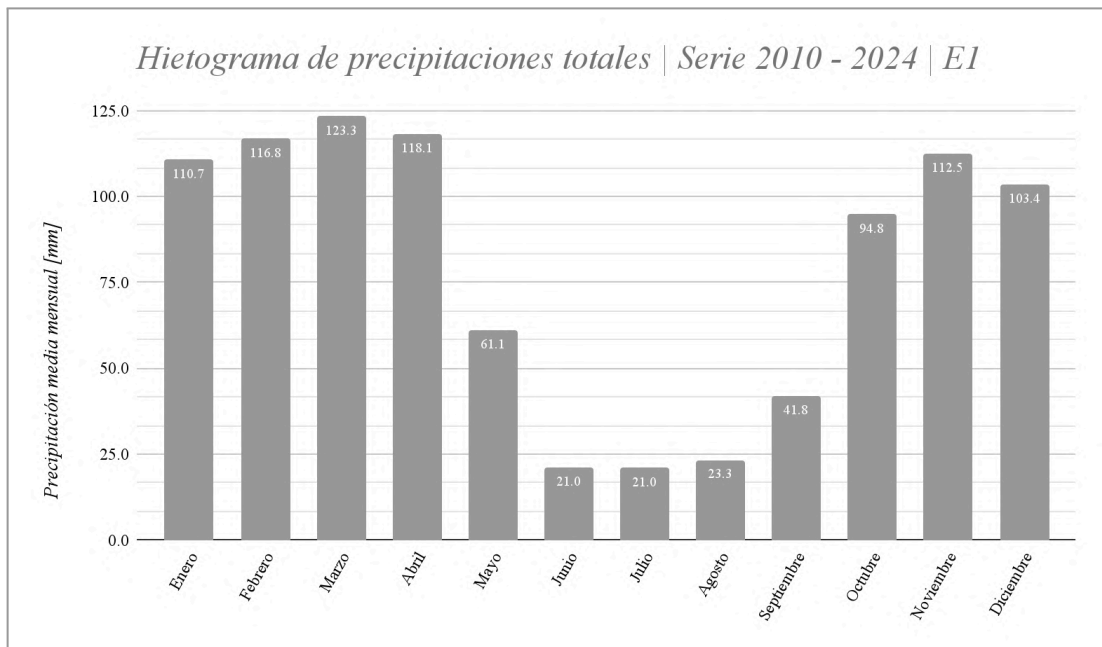


Figura 5.26. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E1.

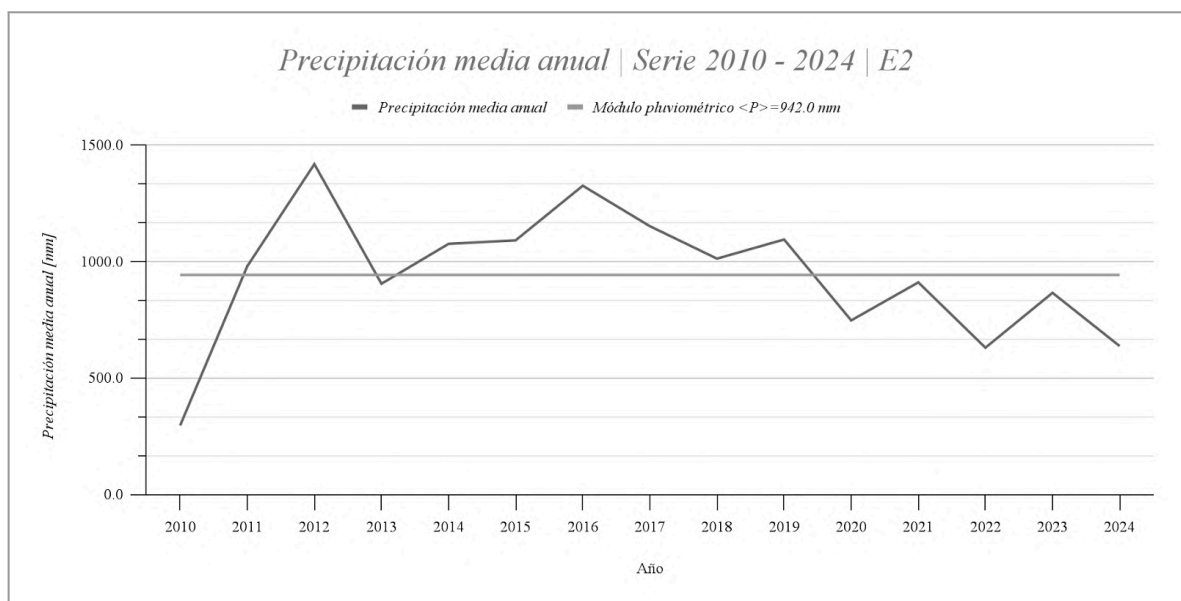


Figura 5.27. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E2.

E2		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1417.6	2012
Precipitación mínima [mm]:	629.4	2022
Mes más lluvioso [mm]:	115.3	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	20.7	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	942.0	

Tabla 5.16. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E2.

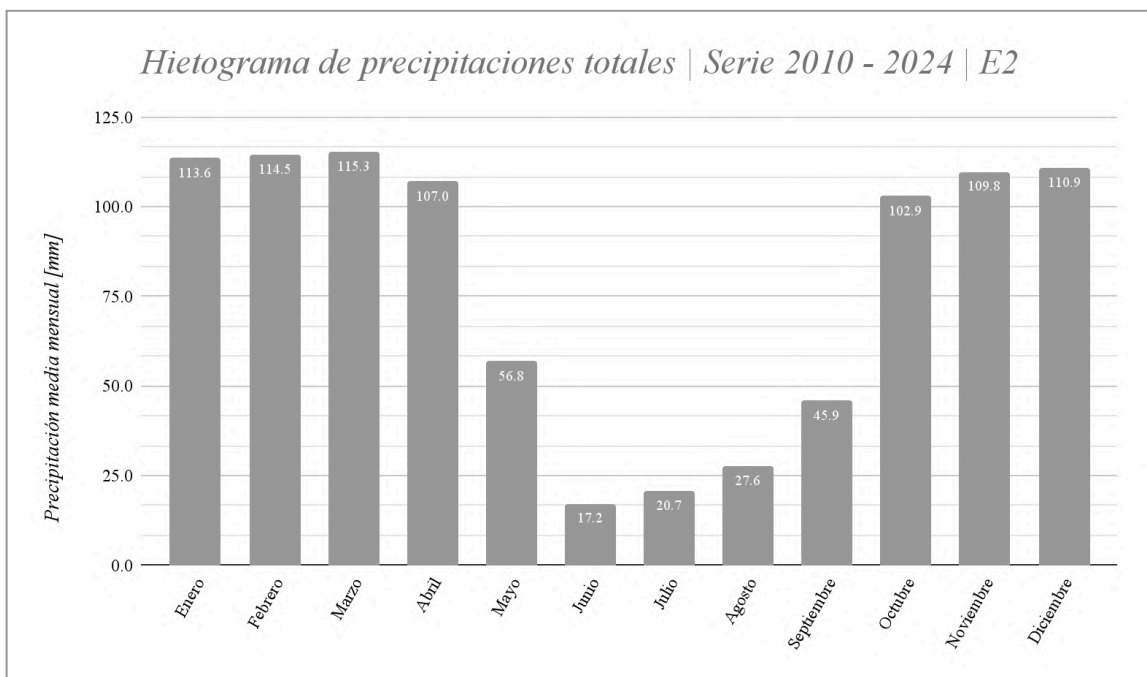


Figura 5.28. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E2.

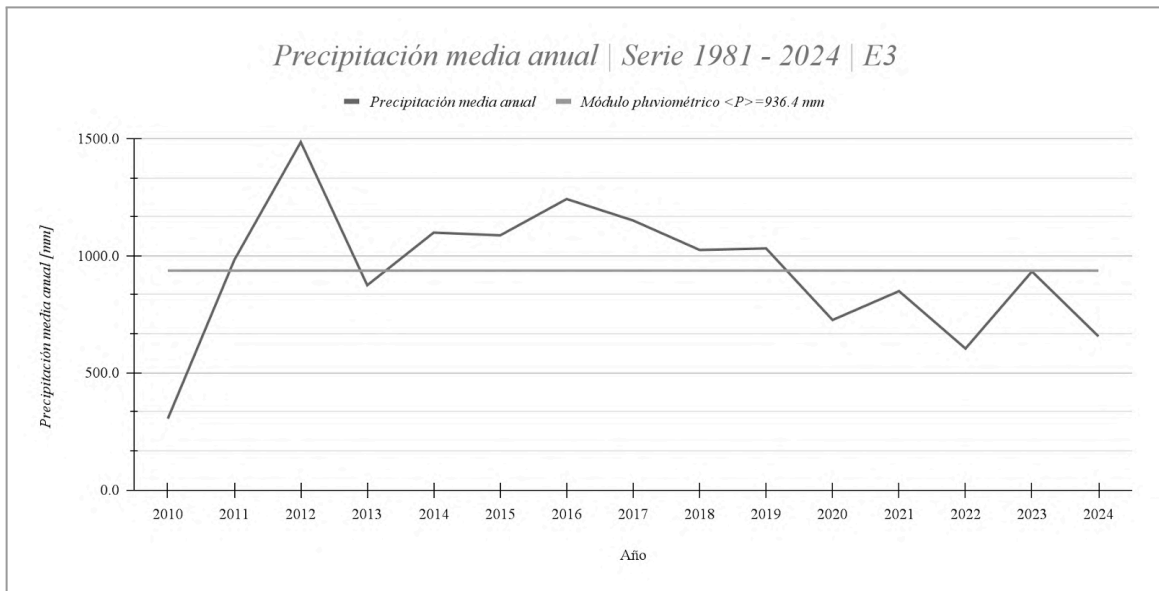


Figura 5.29. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E3.

E3		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1485.6	2012
Precipitación mínima [mm]:	603.4	2022
Mes más lluvioso [mm]:	115.5	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	16.4	Junio
Módulo pluviométrico [mm]:	936.4	

Tabla 5.17. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E3.

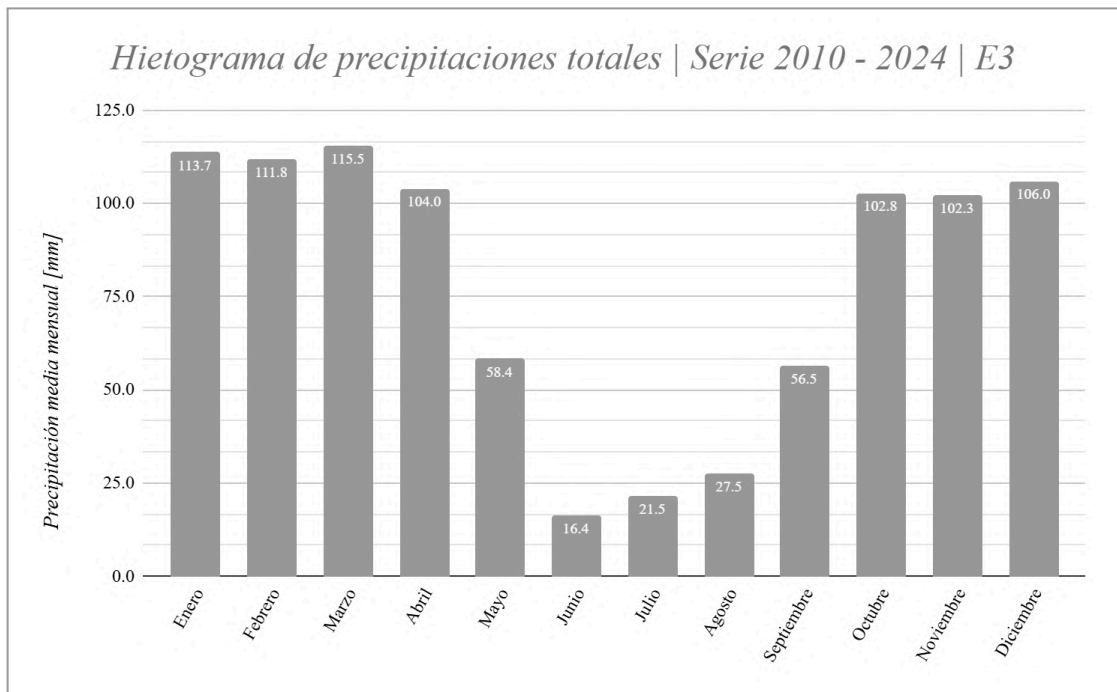


Figura 5.30. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E3.

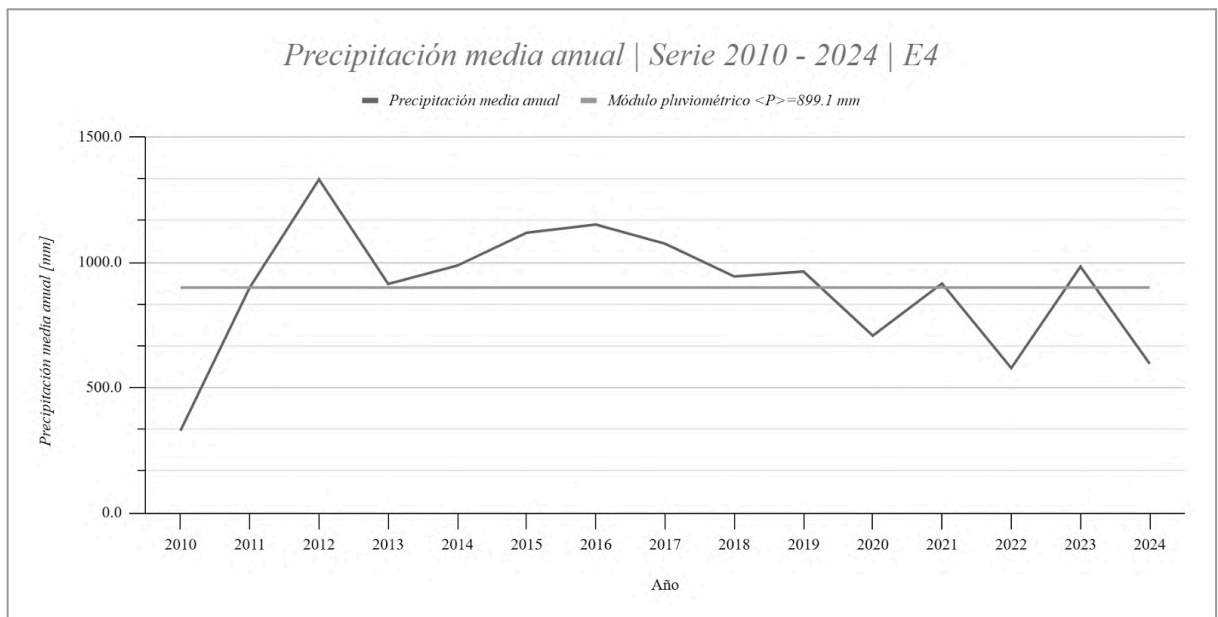


Figura 5.31. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E4.

<i>E4</i>		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1331.0	2012
Precipitación mínima [mm]:	577.7	2022
Mes más lluvioso [mm]:	108.4	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	15.5	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	899.1	

Tabla 5.18. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E4.

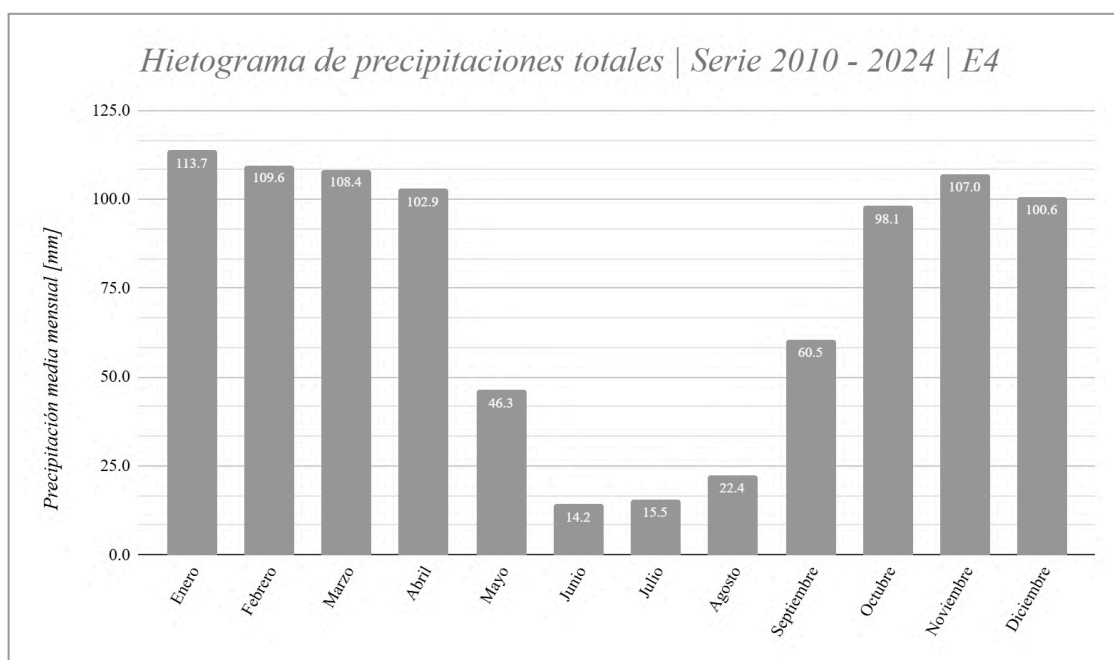


Figura 5.32. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E4.

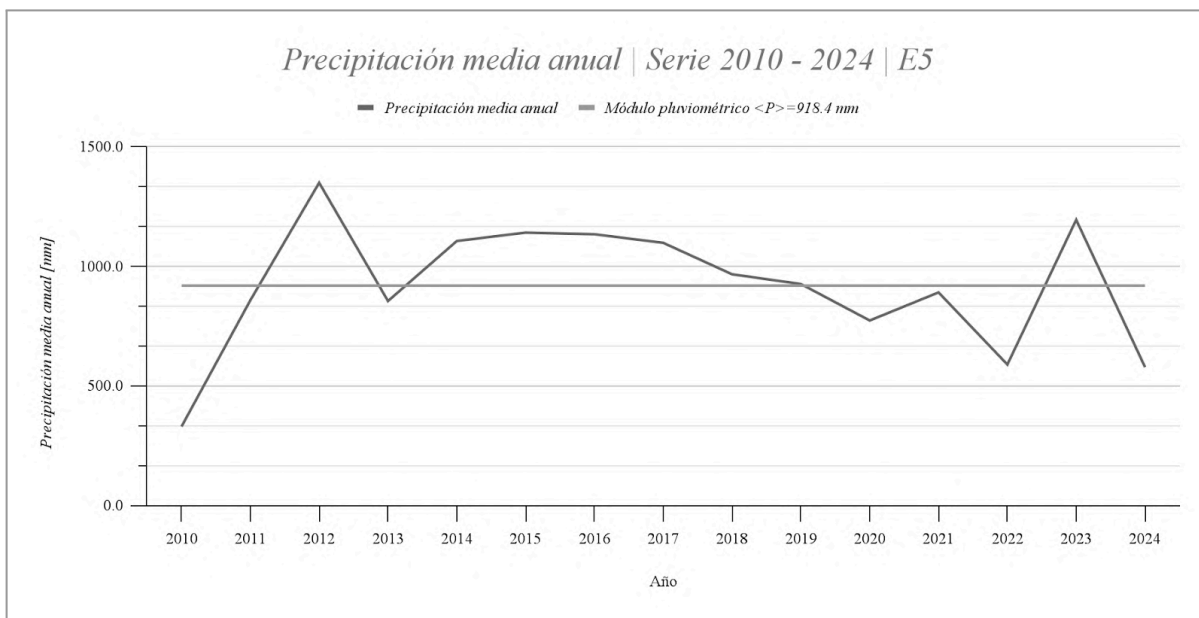


Figura 5.33. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E5.

E5		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1348.4	2012
Precipitación mínima [mm]:	577.6	2024
Mes más lluvioso [mm]:	107.0	Marzo
Mes menos lluvioso [mm]:	16.1	Julio
Módulo pluviométrico [mm]:	918.4	

Tabla 5.19. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E5.

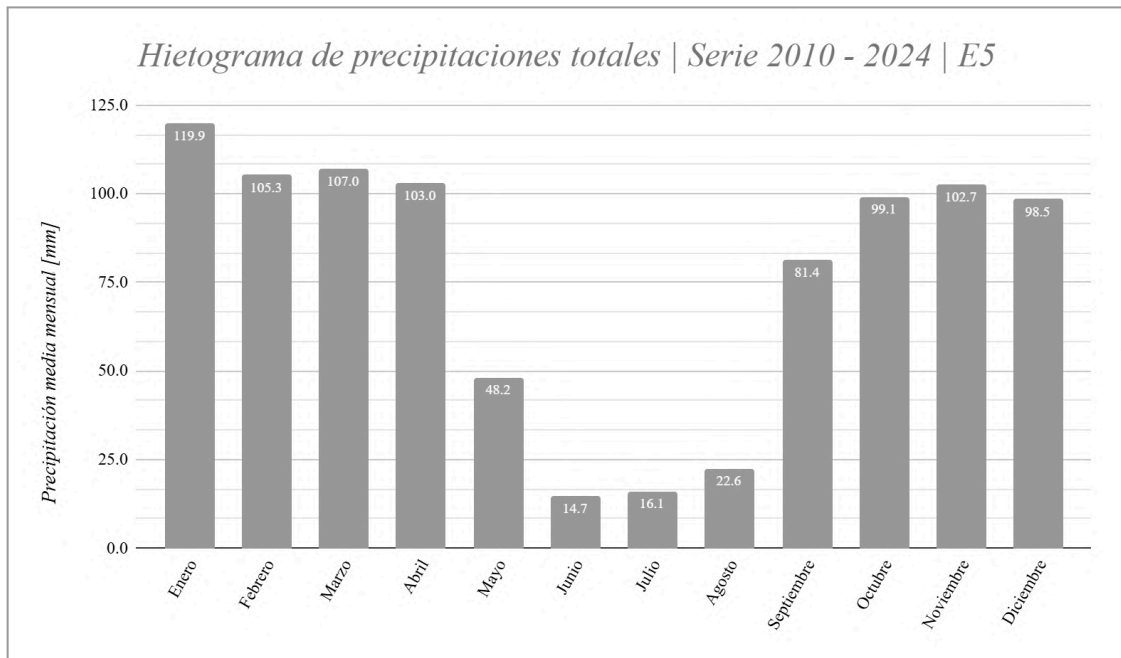


Figura 5.34. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E5.

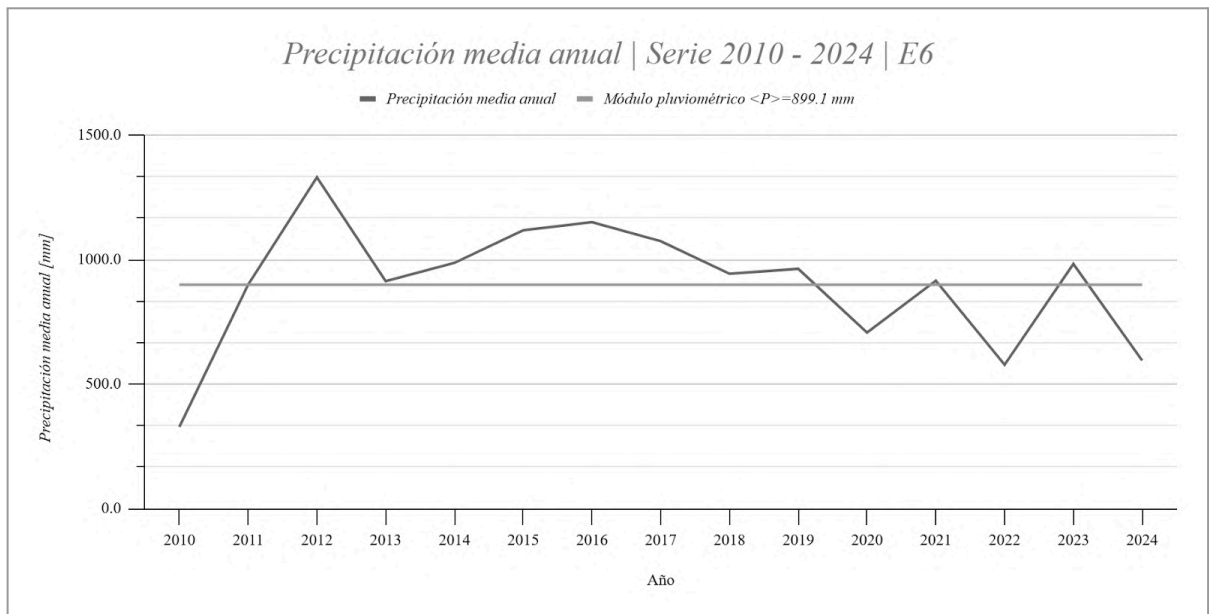


Figura 5.35. Serie temporal de precipitaciones 2010 - 2024, E6.

<i>E6</i>		
Serie 2010 - 2024		
Precipitación máxima [mm]:	1331.0	2012
Precipitación mínima [mm]:	577.7	2022
Mes más lluvioso [mm]:	113.7	Enero
Mes menos lluvioso [mm]:	14.2	Junio
Módulo pluviométrico [mm]:	899.1	

Tabla 5.20. Resumen serie de precipitaciones 2010 - 2024, E6.

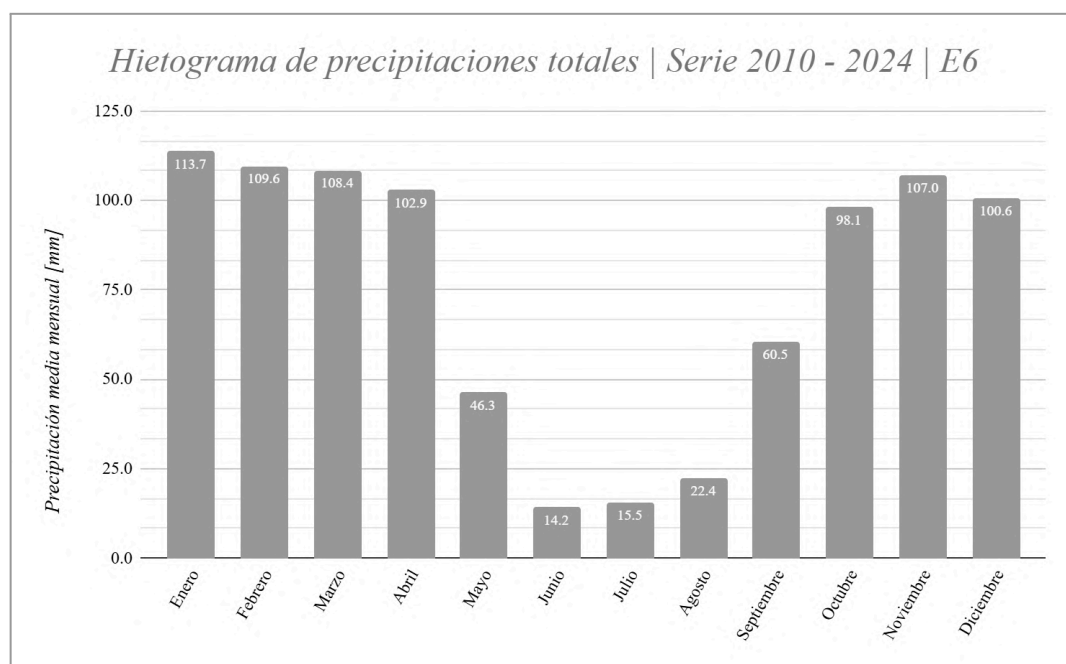
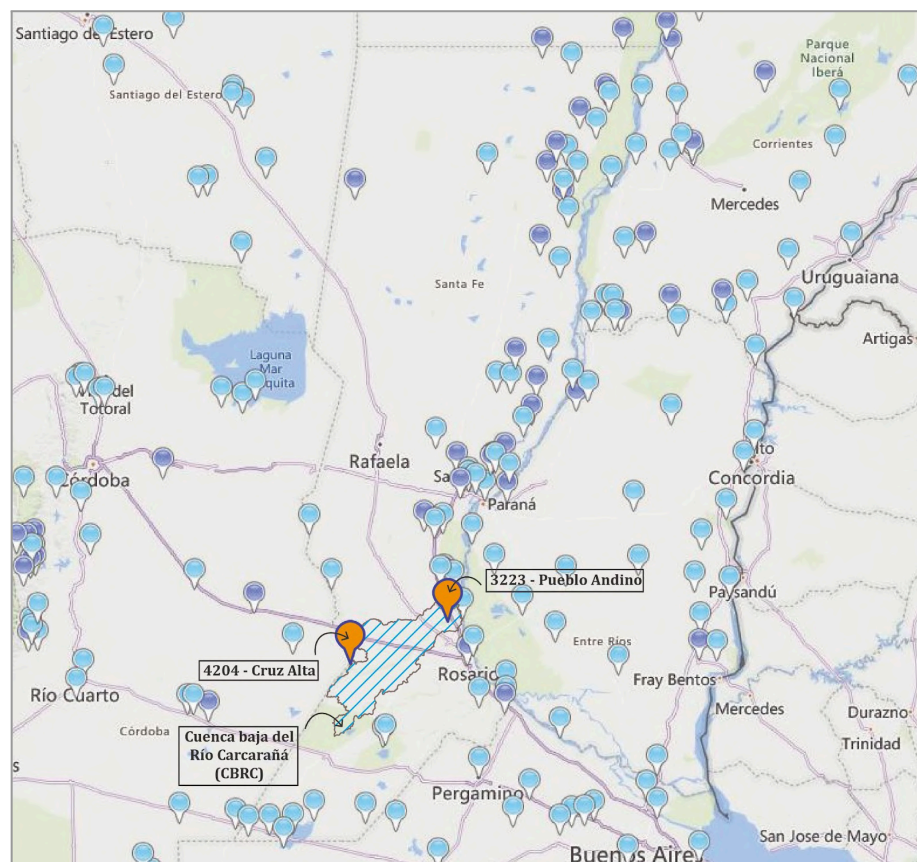


Figura 5.36. Hietograma de precipitaciones totales 2010 - 2024, E6.

### 5.2.3. Caudal

Otra de las variables de interés es el caudal, donde es fundamental determinar el caudal de entrada  $Q_E$  a la cuenca baja del Río Carcarañá en análisis, resultante de los aportes del Arroyo Tortugas, Arroyo de las Mojarras, Río Saladillo y Río Tercero.

Sin embargo, se encuentra inicialmente con escasez de información de datos observados. En la actualidad (2024), de acuerdo al Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se obtiene que en el área de estudio se cuenta únicamente con dos estaciones de aforo, una de ellas es la estación 3223 - Pueblo Andino -  $32^\circ 40' 24''$  S  $60^\circ 51' 57,40''$  O y la otra es la 4204 - Cruz Alta -  $33^\circ 00' 20,23''$  S  $61^\circ 47' 14,73''$  O, *Figura 5.37*.



*Figura 5.37. Estaciones de aforo activas SNIH - SSRH.*

Por lo tanto es de gran importancia contar con los aforos realizados en ambas secciones debido a que, por un lado, la sección aforada en Cruz Alta sobre el puente de la Ruta Provincial N° 15, acumula la totalidad de los aportes de la Cuenca Alta del Carcarañá, proveniente de la provincia de Córdoba, Arroyo Tortugas y Arroyo Las Mojarras, es decir, representa para el área en estudio el caudal de entrada a la misma. Mientras que, la estación en Pueblo Andino, representa el caudal observado, con el que se validarán los datos de caudales simulados por SWAT en esta localidad, dato fundamental para la calibración y validación de la salida obtenida del modelo hidrológico.

Si se accede al Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH), ingresando en la estación 3223 - Pueblo Andino, se verifica que en la misma existen datos de aforo observados desde el 28 de julio de 1983 hasta el 21 de mayo de 2024, *Figura 5.38*.

Fecha y Hora	Altura Escala	Caudal Líquido	Caudal Sólido Grueso	Caudal Sólido Fino
28/07/1983 10:00	0.68 m	44.36 m3/s		
10/08/1983 10:00	0.56 m	29.20 m3/s		
19/08/1983 10:00	0.53 m	23.49 m3/s		

*Figura 5.38. Datos aforo estación 3223 - Pueblo Andino, SNIH - SSRH.*

De igual forma, en la estación 4204 - Cruz Alta, se puede observar que en la misma existen datos de aforo observados desde el 26 de enero de 2018 hasta el 10 de mayo de 2024, *Figura 5.39*.

Fecha y Hora	Altura Escala	Caudal Líquido	Caudal Sólido Grueso	Caudal Sólido Fino
26/01/2018 13:36	2.43 m	99.52 m3/s		
27/02/2018 13:38	1.70 m	33.10 m3/s		
27/03/2018 13:57	1.59 m	31.23 m3/s		

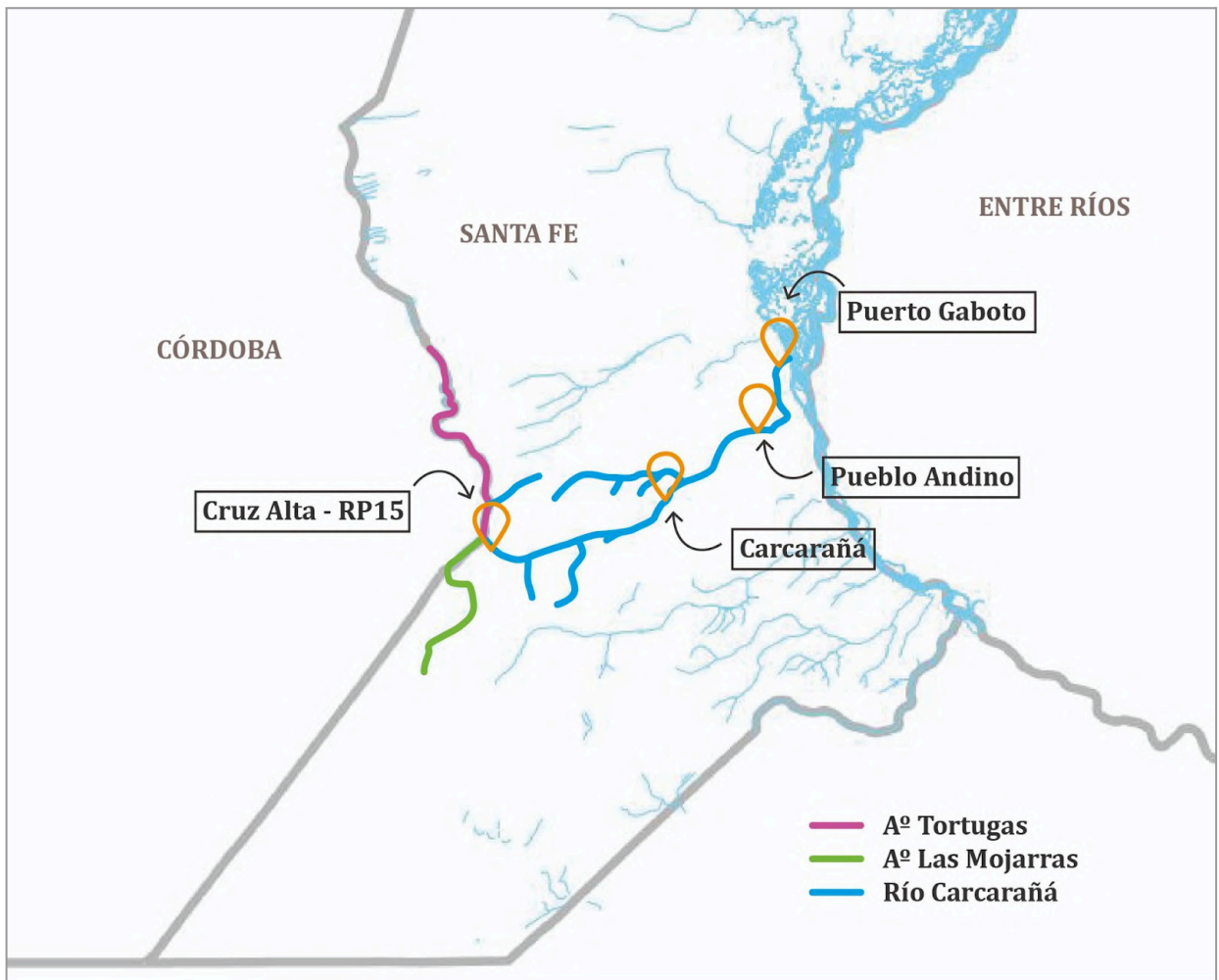
*Figura 5.39. Datos aforo estación 4204 - Cruz Alta, SNIH - SSRH.*

Por lo tanto, no se cuenta con los datos observados de caudal suficientes, en la sección de entrada a la cuenca baja en el período de tiempo de interés (1 de julio de 2014 al 30 de junio de 2024).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que desde el año 2013 hasta 2018, se realizaron campañas de aforo como resultado de la colaboración entre el Centro de Estudios en Tecnología del Agua de la Universidad

Nacional de Córdoba (CETA - UNC), la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Agua y Medio Ambiente de la Provincia de Córdoba y el Centro Internacional Franco-Argentino de Información y Ciencias de Sistemas (CIFASIS), con el objetivo realizar, de forma experimental, la cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica de los caudales superficiales, en diferentes secciones transversales seleccionadas de los principales tributarios de la cuenca completa del Río Carcarañá.

En Santa Fe, se definieron cuatro (4) secciones de monitoreo, *Figura 5.40.*, Cruz Alta sobre el puente de la Ruta Provincial N° 15 (RP15), Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto.

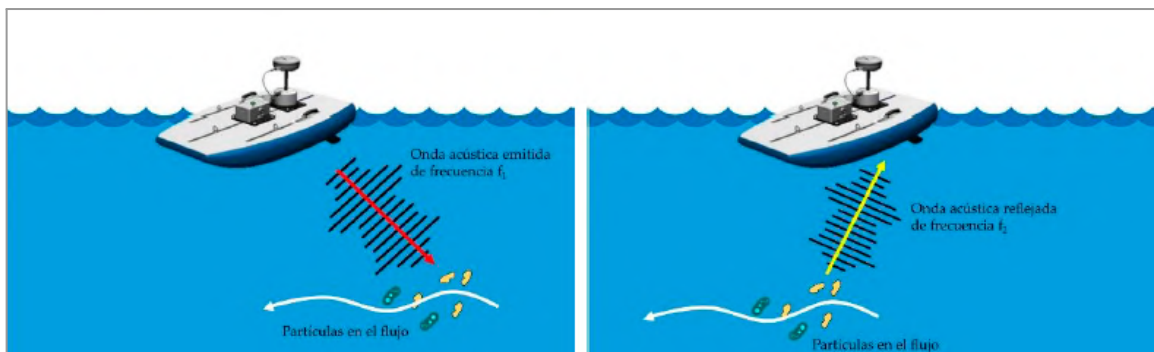


*Figura 5.40. Secciones de monitoreo sobre el Río Carcarañá.*

Para la obtención de los caudales observados en las campañas mencionadas, se estableció comunicación, a través de la Dra. Ing. Margarita Portapila y el Dr. Ing. Martín Romagnoli, con el Dr. Ing. Carlos Marcelo García de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – UNC. Este último nos facilitó la tesis doctoral del Dr. Ing. José M. Díaz Lozada, en la cual se indican los procedimientos utilizados y datos obtenidos. A continuación, se presenta un breve resumen de dichos elementos, así como la forma en que estos datos se utilizan en el desarrollo del presente proyecto.

En primer lugar, se debe destacar que el instrumental utilizado fue un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) el cual permite realizar mediciones con un alta resolución espacial y temporal del flujo. Es uno de los instrumentos más utilizados en las últimas dos décadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

Los ADCPs determinan la velocidad del flujo utilizando el principio Doppler, cambio en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre emisor y receptor. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia ( $f_1$ ), la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia ( $f_2$ ) diferente con la que fue emitida, *Figura 5.41*. Con ambas frecuencias se puede obtener la velocidad relativa entre el flujo y el ADCP mediante la ley que describe el efecto Doppler.



*Figura 5.41. Esquema de funcionamiento de un ADCP.*

El instrumento utilizado fue un ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5® de 3 MHz, *Figura 5.42.*, el cual muestrea el caudal en un rango de nivel de agua de 0,3 m a 15 m y proporciona batimetría de sección (profundidad) y velocidades de flujo en tres direcciones ortogonales, permitiendo la definición de descarga de caudal con un error de medición de menos de  $\pm 5\%$ .



*Figura 5.42. ADCP YSI/SonTek RiverSurveyor S5®.*

El ADCP no puede moverse de forma independiente, por lo cual, las mediciones se puede realizar siguiendo dos métodos diferentes:

- *Plataforma móvil.*
- *Bote pequeño controlado por operadores desde ambas márgenes del río o mediante soga.*
- *Plataforma fija.*

En esta campaña, se utiliza una plataforma móvil, *Figura 5.43.*, sobre la cual se monta el ADCP, para permitirle hacer un cruce transversal a la dirección del flujo (transecta) a una velocidad menor a la velocidad del flujo, manteniendo la velocidad y dirección correctas para lograr mediciones de buena calidad. Se pueden instalar dispositivos adicionales en la plataforma, como los utilizados en esta campaña de aforo, un módulo de procesamiento y comunicación (utilizando el sistema Bluetooth) y un GPS diferencial con su antena.



*Figura 5.43. Plataforma móvil para el ADCP.*

Se debe efectuar un número par de cruces o transectos (se realizaron cuatro transectos como metodología en la campaña), con un tiempo mínimo de medición de 720 s en cada sección de medición (Mueller y Wagner, 2009).

Mediante el instrumento mencionado, se realizaron mediciones de flujo para diversas condiciones de caudal (bajo, normal y alto), coincidiendo además con eventos hidrológicos máximos extremos donde se veía superada la cota de inundación. Estas condiciones permitieron determinar curvas altura-caudal en las secciones en estudio que cubrían todos los rangos de altura del flujo, incluyendo la cota de máxima capacidad de escurrimiento del cauce.

Para los intereses de este proyecto, resultan inicialmente útiles los caudales aforados en la sección de entrada a la subcuenca de en estudio, sobre el puente de RP15 en Cruz Alta, *Tabla 5.21.* y a la salida, en Pueblo Andino, *Tabla 5.22.*

Datos aforados RP15 (Díaz Losada et al., 2013-2018)		
<i>Fecha</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Altura desp. [m]</i>
11/06/13	49.80	1.07
30/09/2013	33.50	0.75
19/11/2013	65.00	1.32
08/04/2014	276.50	3.75
10/06/2014	87.60	1.67
09/09/2014	57.90	1.21
16/10/2014	65.70	1.34
18/11/2014	41.80	0.92
<b>09/03/2015</b>	<b>948.70</b>	<b>8.31</b>
28/04/2015	231.50	3.32
29/04/2015	239.00	3.40
09/06/2015	90.00	1.70
08/09/2015	64.90	1.32
09/09/2015	77.00	1.51
17/11/2015	185.40	2.86
08/03/2016	470.90	5.31
07/06/2016	178.90	2.79
01/08/2016	157.40	2.55
06/09/2016	85.70	1.64
08/11/2016	151.10	2.48
23/11/2016	89.00	1.69
20/01/2017	238.50	3.39
14/03/2017	73.60	1.46
13/06/2017	116.80	2.06
12/09/2017	99.10	1.83
28/11/2017	36.00	0.80
13/03/2018	31.90	0.72

*Tabla 5.21. Resultados de la campaña de aforo sección RP15, Cruz Alta. Díaz Losada et. al. (2019).*

Datos aforados PA (Díaz Losada et al., 2013-2016)		
Fecha	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Altura desp. [m]
01/10/2013	31.84	0.41
09/04/2014	344.90	4.14
10/09/2014	64.90	1.04
29/04/2015	239.00	3.17
09/09/2015	77.00	1.23
18/11/2015	315.50	3.88
<b>09/03/2016</b>	<b>553.60</b>	<b>5.75</b>
24/11/2016	104.50	1.63

Tabla 5.22. Resultados de la campaña de aforo sección Pueblo Andino. Díaz Losada et. al. (2019).

Se resaltan en Tablas 5.21. y 5.22., los caudales máximos observados en la sección correspondiente. En Figura 5.44. se presenta la fotografía correspondiente al aforo de la máxima capacidad del cauce en RP15, Cruz Alta, el 09 de marzo de 2015 (Díaz Losada et. al. 2019) para la cual destaca que, con el valor de caudal de 948,70 m<sup>3</sup>/s, la provincia de Córdoba emitió una alerta a la provincia de Santa Fe para gestionar el riesgo de inundación aguas abajo en ambas provincias.



Figura 5.44. Máximo caudal registrado con el ADCP de CETA - UNC el 09 de marzo de 2015, RP15 - Cruz Alta.



Figura 5.45. ADCP posicionándose en RP15, Cruz Alta (Díaz Losada et al., 2013-2018).

A partir de los datos obtenidos de la campaña con el ADCP (a modo de ejemplo en la *Figura 5.45*. se presenta una fotografía brindada por Díaz Losada et al. 2019 del instrumento en el puente de RP15), en CETA-UNC, elaboraron las curvas de Altura-Caudal (H-Q) que relacionan los valores de caudales superficiales escurridos en el sistema fluvial con la lectura de la superficie libre obtenida a través de una escala. Para desarrollarlas realizaron un análisis estadístico de los valores observados usando la ecuación presentada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS (Kennedy, 1984). De forma general se puede expresar:

$$Q = \varphi(H - H_{Q0})^\varepsilon = \varphi\Delta H^\varepsilon$$

Donde:

- $\varphi, \varepsilon$ : Constantes de calibración.
- $H$ : Altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia.
- $H_{Q0}$ : altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento, caudal nulo s/sist. referencia.

Se debe tener presente que no necesariamente el nivel de la escala coincide con el valor del nivel que corresponde al caudal nulo.

Además, el asesor Dr. Ing. Martín Romagnoli nos otorgó la serie de alturas hidrométricas diarias registradas correspondientes al periodo comprendido entre el 5 de junio de 2015 al 31 de mayo de 2018, obtenidas como parte de la campaña de campo en conjunto con CETA-UNC y la SRH de Córdoba. Dicho recurso fue procesado a conciencia, completando los valores NaN (posición en un conjunto de datos donde falta un valor o el valor es indefinido) y unificando las lecturas correspondientes a salidas de campo con las obtenidas de forma remota.

En la *Tabla 5.23.* se puede observar un resumen de los datos obtenidos.

<i>Fuentes de datos - Caudales entrada en Cruz Alta - Periodo 01/07/2010 a 30/06/2024 (5114 días)</i>					
Origen	Datos observados		Período de datos		Observaciones
	Nº datos	%	Desde	Hasta	
H observadas Dr. Ing Martín Romagnoli	909	17.77%	05/06/2015 (*)	31/05/2018 (*)	Varios intervalos con faltante de datos, errores sistemáticos y accidentales
Aforos Díaz Losada et al. (2019)	27	0.53%	11/06/2013	13/03/2018	Valores aforados altura y caudal
H observadas SNIH	2,349	45.93%	25/01/2018	30/06/24	-
Aforos SNIH	37	0.72%	26/01/2018	10/05/24	Valores aforados altura y caudal

*Tabla 5.23. Fuentes de datos - Caudales de entrada Cruz Alta.*

Luego de la búsqueda y obtención de datos, surge el interrogante de cómo se pueden combinar los mismos para obtener el hidrograma de paso diario que se va a utilizar como entrada al modelo.

Se prueban distintas combinaciones para lograr el objetivo mencionado. Una de las opciones exploradas es utilizar la ley H-Q y aforos de Díaz Losada et al. (2019) en conjunto con alturas hidrométricas observadas por SNIH, interpolando linealmente entre puntos aforados, debido a que no se contaba con registros de altura hidrométricas inferiores al 25 de enero de 2018. Y para el período de precalentamiento, se mantiene constante el primer caudal del período de análisis. Del 25/01/2018 al 30/06/2024 se utilizan la alturas del SNIH con la ley H-Q mencionada para obtener los caudales diarios, pero se debe destacar que el SNIH para medir las alturas hidrométricas utiliza un escala hidrométrica o un sensor, el cual tiene un referencia diferente a los aforados por Díaz Losada et al. con el ADCP, y no son exactamente la misma sección de aforo en Cruz Alta, *Figura 5.45.* Es por ello, que se realiza, en esta combinación, una corrección de la alturas aforadas en el único punto común de ambas series, el 13 de marzo de 2018 con un caudal objetivo de 31,90 m<sup>3</sup>/s y altura de 0,72 m. Para ese mismo caudal, el SNIH registra una altura de 1,63 m, por lo cual la corrección de alturas es  $\Delta H = -0,91$  m.

Esta metodología fue analizada y discutida en una reunión presencial con nuestra directora, la Dra. Ing. Margarita Portapila y su equipo de trabajo integrado por el Ing. Franco Trivisonno, Dr. Ing. Martín Romagnoli y Dr. Ing. Enrique Montero Bulacio, en el Centro Internacional Franco-Argentino de Información y Ciencias de Sistemas (CIFASIS), el día jueves 24 de octubre del 2024 a las 15:00 hs.

Como resultado de este encuentro, surge la idea de procesar y utilizar las alturas hidrométricas (05/06/2015 a 31/05/2018) brindadas por el Dr. Ing. Martín Romagnoli en conjunto con la ley H-Q de Díaz Losada et al.

(2019), y con los aforos realizados por el SNIH emprender la búsqueda de construcción de una ley H-Q propia.

Finalmente, se hace un resumen de la metodología utilizada para la obtención de caudales de entrada a paso diario, en el período completo de análisis es la siguiente:

- **Tramo 1 (T1):** correspondiente al período comprendido entre el 01 julio de 2010 hasta el 10 de junio de 2013. En el mismo, se utiliza un valor diario constante basado en el primer registro aforado, correspondiente al 11 de junio de 2013 de acuerdo a Díaz Losada et al. (2019). Se debe observar que esto no genera inconveniente alguno debido a que se encuentran dentro del periodo de precalentamiento del modelo.
- **Tramo 2 (T2):** a partir de los datos recopilados y analizados por Díaz Losada et al. (2019) se realiza una interpolación lineal entre los valores aforados comprendidos en el período desde el 11 de junio de 2013 al 4 de junio de 2015.
- **Tramo 3 (T3):** desde el 5 de junio de 2015 al 8 de septiembre de 2015 se utilizan las alturas hidrométricas brindadas por el Dr. Ing. Martín Romagnoli y la ley H-Q de Díaz Losada et al. (2019).
- **Tramo 4 (T4):** de igual forma que en el tramo 2, se interpola linealmente entre valores aforados, para el 9 de septiembre del 2015 hasta el 8 de marzo de 2016. Esto es así debido a que en las alturas hidrométricas recopiladas por el Dr. Ing. Martín Romagnoli se detectó que el 10 de noviembre de 2015 se soltó la bolla, lo cual generó inconsistencia en los datos medidos, es decir, se trata de un error accidental. Por lo tanto, al analizar y comparar los caudales obtenidos con la serie de alturas hidrométricas y los aforados por Días Losada et al. (2019), se encuentra que existe un valor atípico correspondiente al 17 de noviembre de 2015, con una diferencia de 104,10 m<sup>3</sup>/s, generado por el mal funcionamiento del instrumento. Ante esto, se decide encontrar el valor observado anterior y posterior que no estén afectados, o su influencia sea mínima, por este error detectado, esos valores corresponden al 9 de septiembre de 2015 y el 8 de marzo del 2016, justificando la metodología utilizada en este tramo.
- **Tramo 5 (T5):** superada la influencia del error accidental, se continúa trabajando con la serie de alturas hidrométricas y ley H-Q, de igual forma que en el tramo 3, para el período desde el 9 de marzo de 2016 al 31 de mayo de 2018.
- **Tramo 6 (T6):** comprendido desde el 1 de junio de 2018 al 30 de junio de 2024, período para el cual se cuenta con las alturas hidrométricas observadas por SNIH y se utiliza la ley H-Q desarrollada por los estudiantes que desarrollan este proyecto, cuya obtención se desarrolla a continuación.

En la *Figura 5.46*. se puede observar la serie de caudales diarios de entrada en RP15 compuesta por los distintos tramos mencionados, y en *Tabla 5.24*. se presenta un resumen de la metodología empleada.

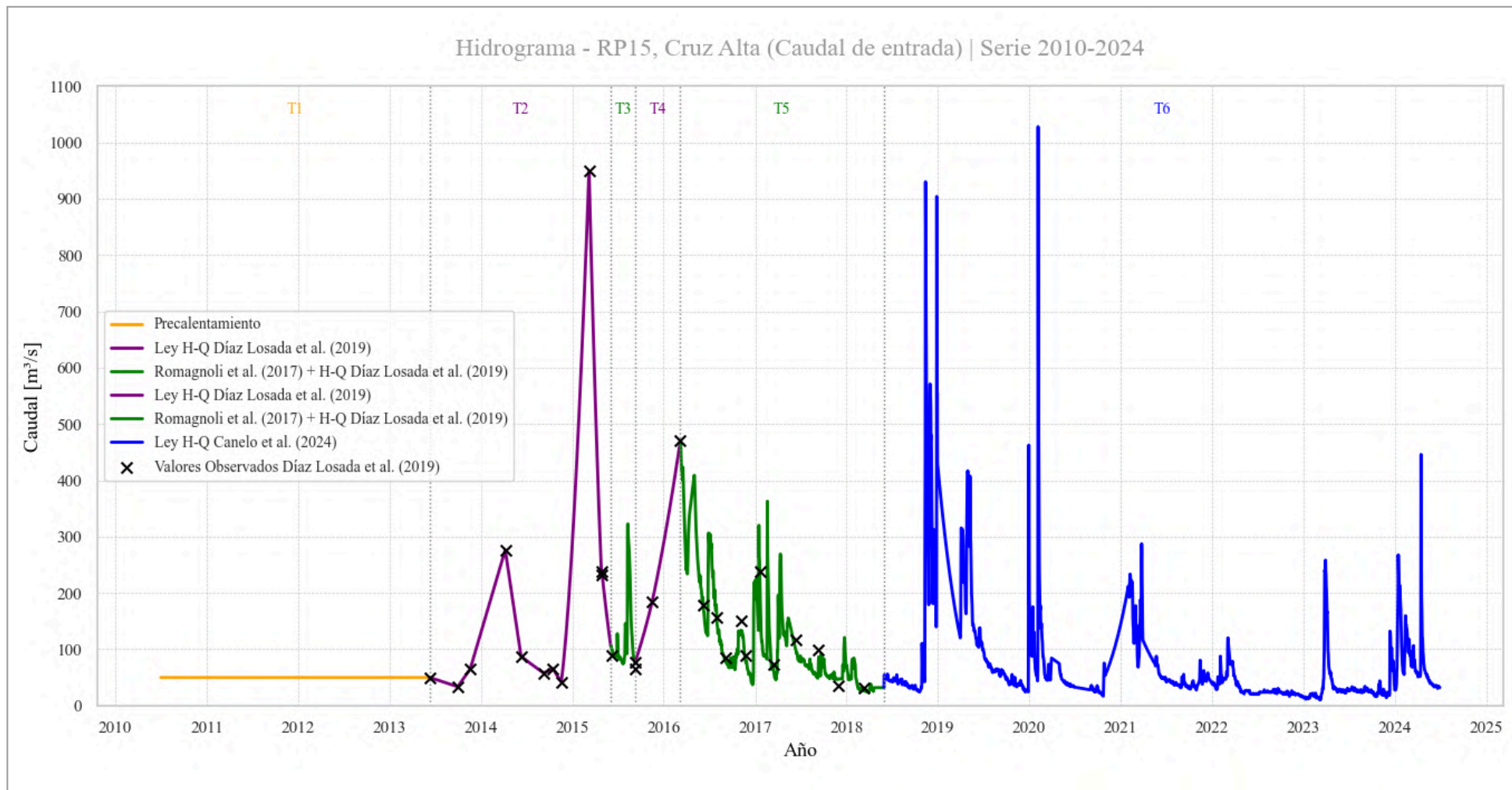


Figura 5.46. Hidrograma de entrada obtenido. Serie 2010-2024.

Periodo		Alturas	Método de obtención de caudal diario
01/07/2010	10/6/2013	-	Constante con primer valor aforado el 11/6/2013 por Díaz Losada et al. (2019)
11/6/2013	4/6/2015	-	Interpolación lineal entre valores aforados por Díaz Losada et al. (2019)
5/6/2015	8/9/2015	Observadas por Romagnoli et al. (2017)	Mediante ley H-Q Díaz Losada et al. (2019)
9/9/2015	8/3/2016	-	Interpolación lineal entre valores aforados por Díaz Losada et al. (2019)
9/3/2016	31/5/2018	Observadas por Romagnoli et al. (2017)	Mediante ley H-Q Díaz Losada et al. (2019)
1/6/2018	30/6/2024	Observadas SNIH	Mediante ley H-Q ajustada Canelo et al. (2024)

Tabla 5.24. Resumen metodología para obtención de caudales de entrada Cruz Alta.

### Generación de curva Altura - Caudal | Cruz Alta - Río Carcarañá

Como se ha mencionado previamente, para el período comprendido entre el 1 de junio de 2018 hasta el 30 de junio de 2024 se utiliza la Ley H-Q desarrollada por este equipo de trabajo.

Para la elaboración de la misma, se cuenta con datos de aforo observados por SNIH desde el 26 de enero de 2018 hasta el 10 de mayo de 2024, *Figura 5.47*, en la estación 4204 - Cruz Alta. Los mismos se pueden visualizar en la *Tabla 5.25*.

Esta ley H-Q permite, a partir de la lectura de la superficie libre del flujo mediante una escala, obtener los valores de caudales escurridos superficialmente en el sistema hídrico analizado. Además se debe tener en cuenta que el máximo caudal es de tan sólo 155,72 m<sup>3</sup>/s correspondiente al 22 de mayo de 2019, caudal bajo relativo, que no es correspondiente a un evento extremo del lecho, sino al escurrimiento natural del cauce, es decir, esta ley no está ajustada para representar caudales superiores a dicho valor, y realizar una extrapolación puede aumentar los errores cometidos en la aproximación de caudales para eventos extremos.

También se destaca que solo se analizan métricas de error comparando valores observados con los valores calculados, sin realizar ningún tipo de análisis de distribución de probabilidades, y mediante distintas fórmulas experimentales, realizar pruebas de bondad para determinar si la ley de distribución teórica de probabilidades determinada representa adecuadamente la muestra de la población analizada, mediante la obtención de la desviación máxima y determinación del índice de confianza, u otros métodos. Este análisis puede ser realizado posteriormente.

Datos Históricos SNIH - Estación 4204 - Cruz Alta		
Fecha y Hora	Altura Escala [m]	Caudal [m³/s]
26/01/2018 13:36	2.43	99.52
27/02/2018 13:38	1.7	33.10
27/03/2018 13:57	1.59	31.23
24/04/2018 12:25	1.96	49.70
30/05/2018 13:03	2.01	56.26
25/06/2018 12:00	1.88	42.82
09/11/2018 18:35	1.82	38.65
22/05/2019 9:00	2.74	155.72
23/07/2019 13:00	2.14	66.48
26/09/2019 12:15	2	52.05
28/11/2019 16:25	1.86	46.91
28/01/2020 15:30	2.03	56.59
06/03/2020 17:00	1.93	47.34
20/05/2020 10:00	1.83	37.87
28/07/2020 13:00	1.6	31.83
02/11/2020 12:30	1.75	32.68
28/01/2021 15:40	1.9	44.87
18/03/2021 9:24	2.53	106.79
18/05/2021 11:59	2.19	70.34
21/07/2021 13:00	1.82	48.38
13/09/2021 11:00	1.81	39.56
10/11/2021 14:41	1.85	41.25
20/01/2022 14:52	1.66	32.19
30/03/2022 14:07	1.98	52.81
28/05/2022 15:21	1.58	28.86
08/07/2022 17:14	1.54	26.48
16/09/2022 12:50	1.53	22.86
15/11/2022 8:51	1.48	21.24
04/01/2023 19:58	1.32	15.88
20/03/2023 17:42	1.66	30.68
14/05/2023 14:15	1.62	30.01
19/07/2023 13:47	1.63	23.60
16/09/2023 7:39	1.58	25.90
21/11/2023 15:44	1.52	25.38
06/01/2024 16:02	1.62	29.92
26/03/2024 9:10	2.07	56.21
10/05/2024 15:03	1.97	50.98

Tabla 5.25. Datos aforos SNIH - RP15, Cruz Alta. Serie 2018-2024.

Para construir la curva se utiliza la ecuación matemática con fundamento hidráulico presentada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos –USGS- (Kennedy, 1984), presentada con anterioridad, la cual tiene la siguiente expresión:

$$Q = \varphi(H - H_{Q0})^\varepsilon = \varphi\Delta H^\varepsilon$$

Donde:

- $\varphi, \varepsilon$ : Constantes de calibración.
- $H$ : Altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia.
- $H_{Q0}$ : altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento, caudal nulo s/sist. referencia.

Por simplificación en el análisis, la ecuación puede ser expresada de la siguiente forma:

$$Q = a(H - b)^c$$

Donde:

- $Q$ : Caudal de cálculo en  $m^3/s$ .
- $H$ : Altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia.
- $a \equiv \varphi, b \equiv H_{Q0}, c \equiv \varepsilon$ .

Es decir, para realizar el ajuste, se consideran 3 incógnitas (a, b, c) a las cuales se les definen valores límites inferiores y superiores de acuerdo las leyes H-Q obtenidas por Díaz Losada et al. (2019) en toda la cuenca del Río de Carcarañá, que se consideran como valores representativos que caracterizan la cuenca, es decir, que respetan no solo la ecuación matemática sino que también las características hidráulicas del escurrimiento en la misma. Estos límites se pueden observar en la *Tabla 5.26*.

Rangos	$\varphi \equiv a$	$H_{Q0} \equiv b$	$\varepsilon \equiv c$
V. Ascaubi	41.98	-0.31	1.87
V. Maria	26.56	-1.05	1.48
Sarmiento Bell Ville	7.73	-0.16	1.19
Sturla Bell Ville	7.18	1.08	1.22
Inrville R12	32.93	-0.85	0.98
R15	25.41	-0.43	2.01
R6	14.3	1.16	1.64
A° Tortugas	11	-0.18	2.75
Pueblo Andino	24.2	-0.77	1.25
MIN	7.18	-1.05	0.98
MAX	41.98	1.16	2.75

Tabla 5.26. Resumen de rangos de incógnitas, Díaz Losada et al. (2019).

El ajuste, que requiere un elevado número de iteraciones, especialmente al buscar mayor precisión, se realiza utilizando Python, un lenguaje de programación de alto nivel (la sintaxis se asemeja más al lenguaje humano) creado por Guido van Rossum a finales de los años 80 y principios de los 90. Tiene una gramática sencilla y a diferencia de otros lenguajes, prescinde de ciertos símbolos comunes, como los puntos y comas al final de cada sentencia. Muy utilizado actualmente por su simplicidad y versatilidad.

Además, se emplean las siguientes bibliotecas para facilitar el análisis:

- *NumPy*: optimizada para cálculos matemáticos y manipulación de arreglos multidimensionales, permitiendo gestionar grandes volúmenes de datos numéricos con eficiencia.
- *Pandas*: proporciona estructuras como Series y Data Frames, que permiten manejar, organizar y analizar datos de forma eficiente.
- *SciPy*: incluye herramientas avanzadas para optimización, integración y ajuste de curvas, fundamentales para resolver problemas matemáticos de alta complejidad.
- *Matplotlib*: facilita la creación de visualizaciones gráficas, como curvas ajustadas y datos observados, esenciales para interpretar y comunicar resultados.

Se testean distintos métodos de ajuste:

- **Método 1 (Ley H-Q1)**: se mantiene constante el exponente  $c = 1.67$ , fijado de acuerdo a lo propuesto por la ecuación de Manning para canales y ríos, y se ajustan dos incógnitas, el coeficiente  $a$ , que multiplica la ecuación potencial y  $b$ . Como métrica de error para el ajuste se busca minimizar el RMSE obtenido.
- **Método 2 (Ley H-Q2)**: se mantiene constante el exponente  $c = 1.67$ , y se ajustan dos incógnitas,  $a$  y  $b$ . Como métrica de error para el ajuste se busca minimizar el RMSE y el error porcentual promedio EPm obtenido.
- **Método 3 (Ley H-Q3)**: se minimiza el RMSE, ajustando las incógnitas  $a$ ,  $b$  y  $c$ .
- **Método 4 (Ley H-Q4)**: Ley H-Q desarrollada por Díaz Losada et al. (2019) para la sección ubicada en el puente de Ruta Provincial N°15 (RP15), Cruz Alta, se dispone de la siguiente expresión:

$$Q = 25,41(H - H_{Q0})^{1,67}$$

Donde:

- $H_{Q0} = -0,43$  m.
- $H$  expresado en metros [m].
- $Q$  expresado en metros cúbicos por segundo [ $m^3/s$ ].

La misma se puede observar graficada en la *Figura 5.47*.

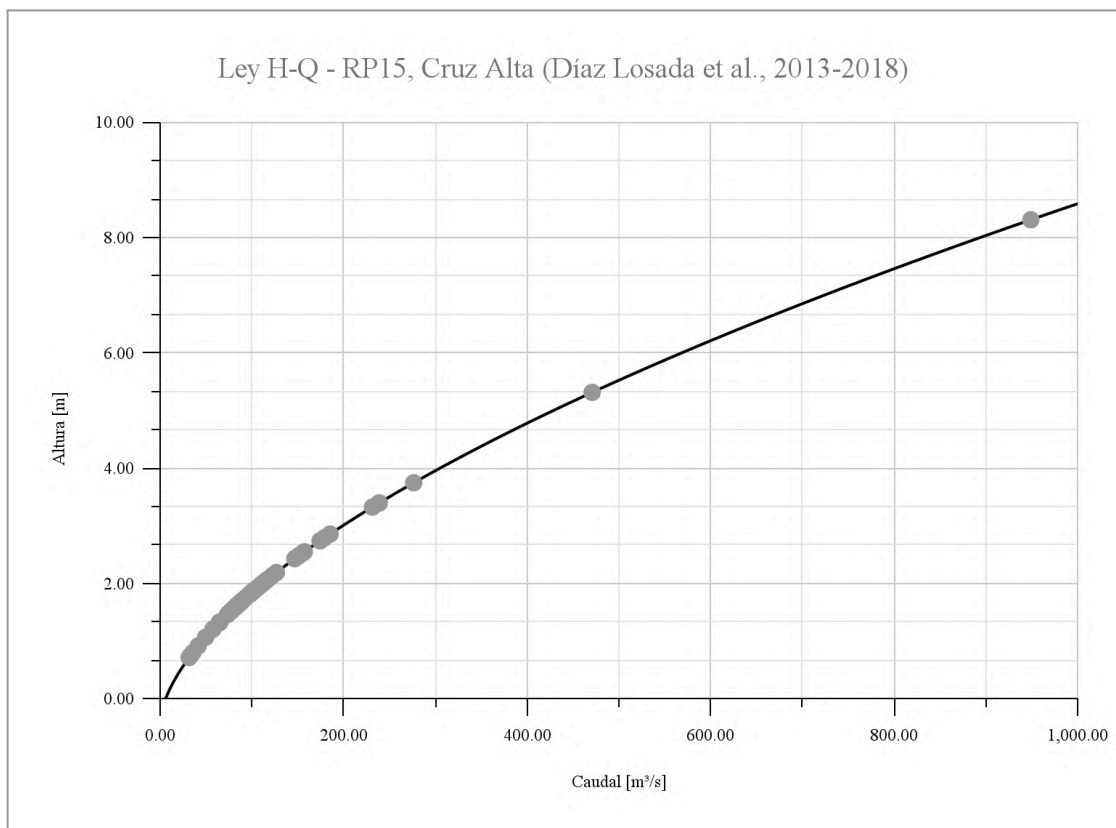


Figura 5.47. Ley H-Q, RP15, Cruz Alta (Díaz Losada et al., 2013-2018).

La misma cuenta con un análisis de distribución de probabilidades y confianza, y está ajustada tanto para valores bajos de caudal como para valores correspondientes a eventos extremos.

- **Método 5 (Ley H-Q5):** el ajuste de la curva se realiza mediante el uso de un algoritmo de optimización numérica que minimiza el error de la función potencial.

A continuación, se explican brevemente algunos fragmentos del script desarrollado para el método 3. En primer lugar mediante la librería Pandas, se define un DataFrame (df), estructura de datos de dos (2) dimensiones que permite guardar distintos tipos de datos en columnas, para almacenar los aforos observados de SNIH procedentes de un archivo .csv creado con columnas H y Q, que incluyen las alturas hidrométricas y caudales aforados respectivamente.

Luego se define las variables Altura y Caudal, a las cuales se le asignan los valores de alturas hidrométricas de la columna H y caudales de la columna Q respectivamente como un array, estructura de datos que almacena un conjunto de valores del mismo tipo en una forma ordenada y de tamaño fijo, de la librería NumPy simplificando el cálculo, mediante .values.

```
df = pd.read_csv('C:/Users/Usuario/Desktop/Ajuste/Libro1.csv', delimiter=";")
Altura = df['H'].values
Caudal = df['Q'].values
```

Luego mediante la función `np.arange(start, stop, step)` de Numpy se genera un array de números en un rango específico para cada una de las incógnitas *a*, *b* y *c*, con un paso de 0.01, precisión a la centésima, definido entre cada valor. Cabe destacar que si se quiere mejorar la precisión, simplemente se debe cambiar el paso. Los argumentos de la función son `start`, valor inicial incluido del rango (límite inferior), `stop`, valor final incluido del rango (límite superior) y `step`, es decir, el paso.

Y se define la función de la ecuación potencial, donde *x* es la variable independiente, de entrada a la ecuación, es decir, las alturas hidrométricas de la variable *Altura* y *a*, *b* y *c* son los parámetros que se usan para ajustar la ecuación.

```
# Rango de valores para a, b y c
a_values = np.arange(7.18, 41.98, 0.01)
b_values = np.arange(-1.05, 1.16, 0.01)
c_values = np.arange(0.98, 2.75, 0.01)

# Función de la ecuación
def equation(x, a, b, c):
    return a * (x - b) ** c
```

El paso siguiente es iterar sobre el array de posibles valores para el parámetro *c* (almacenados en `c_values`). En cada iteración, se selecciona un valor de *c* y se evalúa el error. Además se inicializa la variable temporal `best_b_temp`, en principio, sin asignarle un valor en concreto y cuya función es guardar el mejor *b* encontrado para la iteración con *c*. También se llama a la variable temporal `best_error_temp` con un valor `float("inf")`, es decir, con un valor inicial muy grande, para asegurar que cualquier error sea menor, y su función es almacenar el menor error encontrado para el par *b* y *c*.

```
for c in c_values:
    best_b_temp = None
    best_error_temp = float("inf")
```

Con el valor de *c* en el momento, se ajusta *b* según todos los valores posibles almacenados en `b_values`. Se calcula en `y_pred` usando la ecuación definida, que tiene como entrada los valores de *Altura*, el valor de *a* (el cual si no está definido se le asigna un valor de 1), el valor actual de *b* y el valor de *c* fijado para la iteración. Además se calculan las métricas RMSE y  $R^2$ .

```
for b in b_values:
    y_pred = equation(Altura, best_a if best_a is not None else 1, b, c)
    error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))
    r2 = r_squared(Caudal, y_pred)
```

Paso siguiente se compara el error de la predicción en el momento con el mejor error encontrado hasta el momento. Si el primero es menor, se actualizan `best_b_temp` y `best_error_temp` con los valores de `b` y `error`, correspondientes, que eran menor al mejor error almacenado, y se guarda el  $R^2$  correspondiente.

```
# Se verifica si es el mejor ajuste
if error < best_error_temp:
    best_b_temp, best_error_temp, best_r2_temp = b, error, r2
```

Por último se ajusta a variando en todos sus valores posibles en `a_values`, con los mejores valores de `c` y `b` en el momento, almacenados en `best_b_temp` y `c`. Se obtiene el caudal de cálculo, el RMSE,  $R^2$  y el error porcentual promedio. Y se actualizan los mejores valores globales de `a`, `b` y `c` y las correspondientes métricas de error.

```
# Ahora se ajusta a con los mejores valores de c y b
for a in a_values:
    y_pred = equation(Altura, a, best_b_temp, c)
    error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))
    r2 = r_squared(Caudal, y_pred)
    percentage_error = mean_percentage_error(Caudal, y_pred)

    # Se verifica si es el mejor ajuste
    if error < best_error:
        best_a, best_b, best_c, best_error, best_r2, best_percentage_error =
        a, best_b_temp, c, error, r2, percentage_error
```

Lo descrito hasta el momento es el núcleo del script que representa la lógica con la cual fue creado. Lo restante sirve para crear los gráficos correspondientes y brindar información adicional.

Mediante este método se obtiene la siguiente ley:

$$\text{Ley H-Q3: } Q = 40,71(H - 0,82)^{1,92}$$

Es decir que el mejor resultado de la interacción fue con  $a = 40,71$ ,  $b = 0,82$  y  $c = 1,92$ , obteniendo un RMSE de  $4,33 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R^2=0.9733$  y  $\text{EPm}=9,29\%$ .

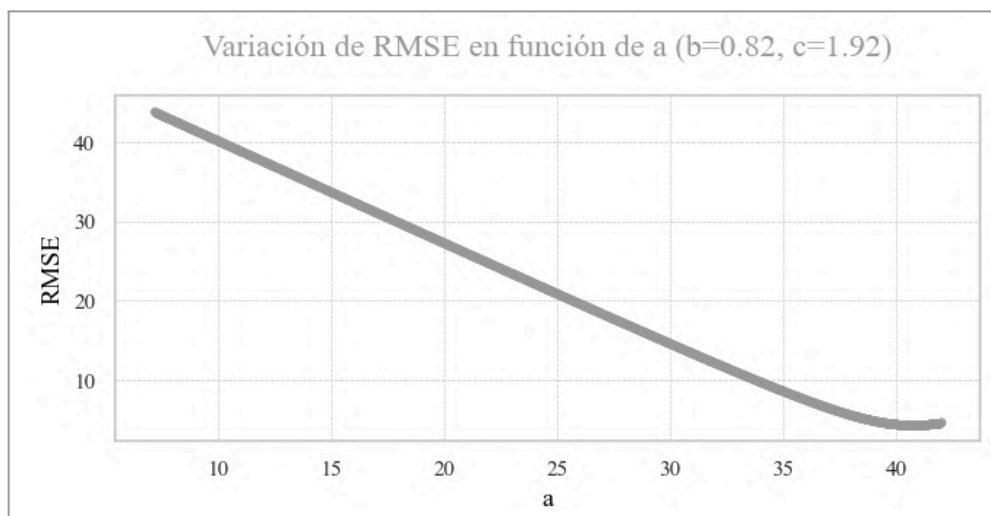


Figura 5.48. Variación del RMSE en función de  $a$  (con el mejor  $b$  y  $c$ ).

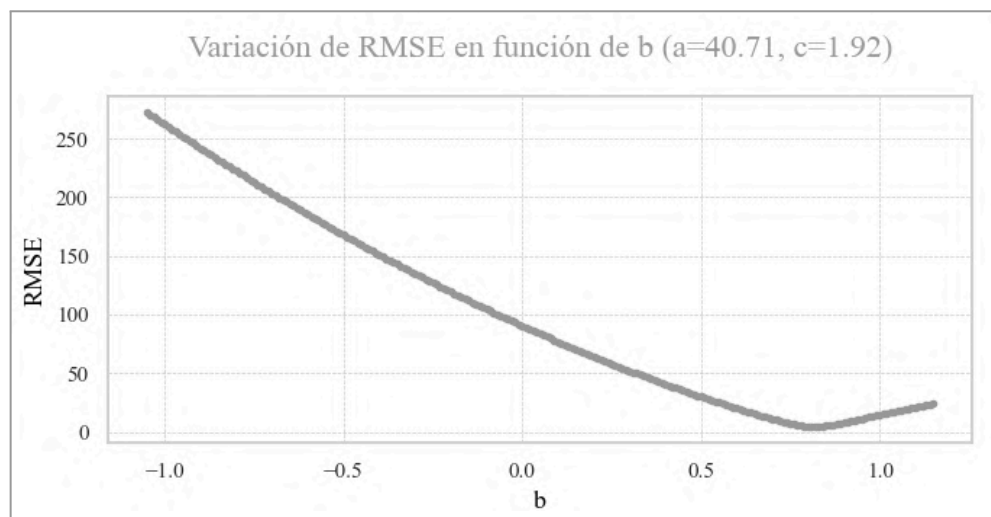


Figura 5.49. Variación del RMSE en función de  $b$  (con el mejor  $a$  y  $c$ ).

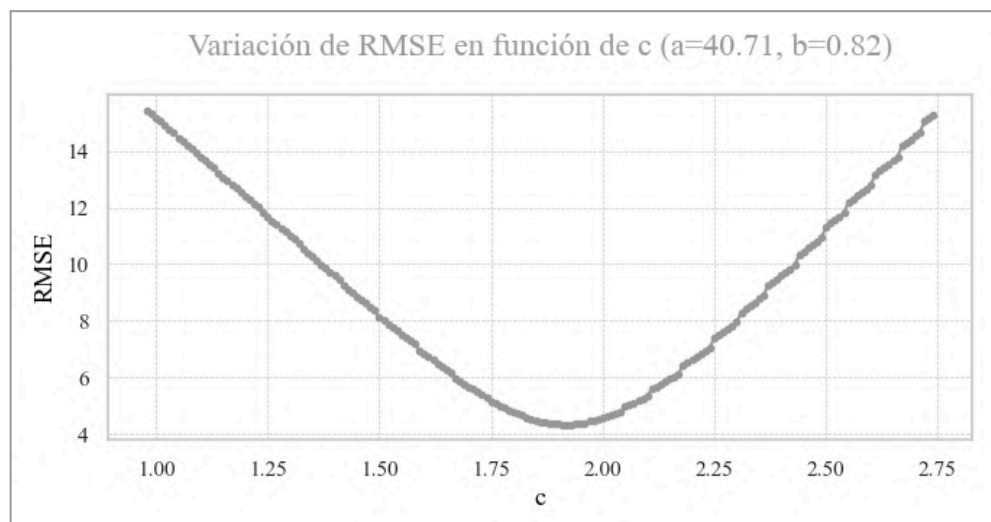


Figura 5.50. Variación del RMSE en función de  $c$  (con el mejor  $a$  y  $b$ ).

En las Figuras 5.48., 5.49. y 5.50. se pueden observar las curvas de variación del RMSE en función de cada uno de los parámetros a, b y c, dentro del rango correspondiente asignado a cada uno. Se puede observar como el error se reduce a medida que se acerca al valor óptimo donde el error es mínimo, es decir, la parte inferior de la curva cóncava donde se da el cambio de tendencia descendente a ascendente.

Esto demuestra en principio que el ajuste está optimizando de manera correcta. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existen distintas formas de plantear la lógica del ajuste, y que en la forma elegida se puede detectar varias posibilidades de mejorarlo. En la Figura 5.51, se observa en el 3D la superficie que representa el RMSE en función de cada combinación de (a, b, c).

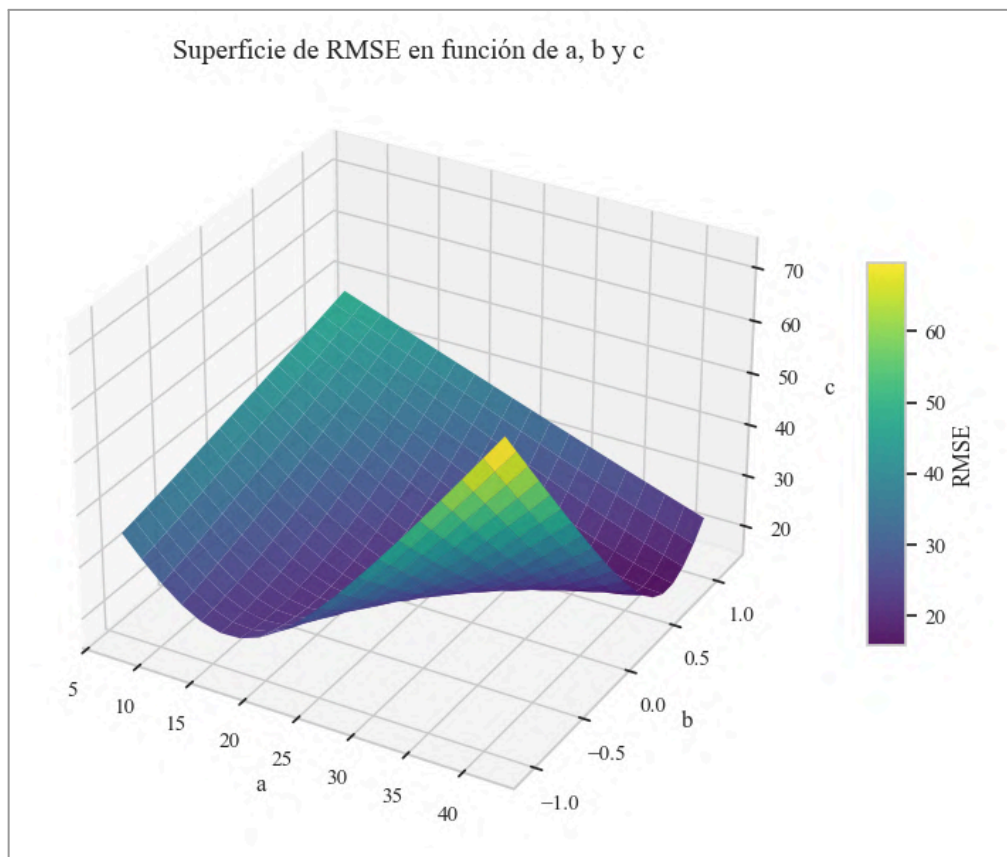


Figura 5.51. Superficie de variación del RMSE en función de a, b y c.

Y en la Figura 5.52, se observa la ley H-Q obtenida del ajuste con las respectivas métricas y valores de optimización, en conjunto con los puntos aforados por SNIH, es decir, los valores observados.

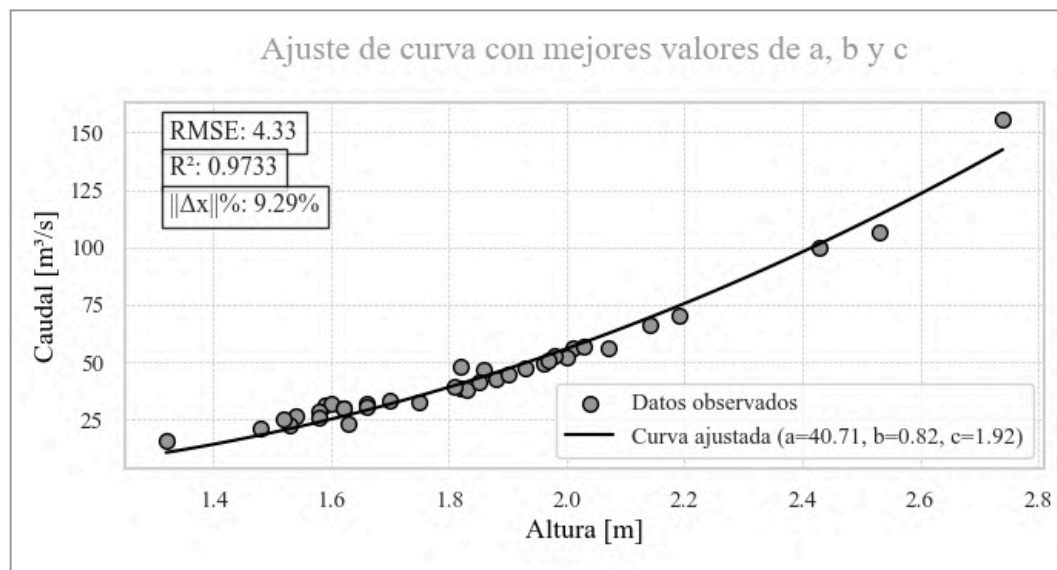


Figura 5.52. Ley H-Q3.

Este es simplemente un primer script de prueba de optimización, el cual se puede mejorar desde la organización y estructura del mismo, hasta su propia lógica. Es decir, por ejemplo se podría haber almacenado c como el best\_c\_temp o pensar en una mejor lógica como por ejemplo hacer un único bucle con todas las combinaciones posibles de a, b y c, trabajar con vectores y calcular el error para todas las combinaciones de los parámetros al mismo tiempo sin bucles anidados, etc. Además, existen combinaciones (a, b, c) que pueden no haber sido analizadas.

Por ello se crea el método 5. En el mismo la idea central es optimizar el ajuste de la curva minimizando el error mediante el uso de un algoritmo de optimización numérica. Entre las distintas librerías existentes, seleccionamos SciPy, disponible en <https://scipy.org/>, que está diseñada para resolver problemas matemáticos, científicos e ingenieriles, proporcionando distintas herramientas avanzadas de integración, optimización, estadísticas, entre otras.

Dentro de la misma, existe el módulo `scipy.optimize` que proporciona funciones para minimizar, como en este caso, o maximizar alguna función objetivo, permitiendo introducir distintas condiciones de bordes o restricciones. Del mismo, se hace uso de la función `minimize` que permite la minimización de una función escalar de una o más variables. Tiene la siguiente estructura general:

```
minimize(fun, x0, args=(), method=None, jac=None, hess=None, hessp=None, bounds=None, constraints=(), tol=None, callback=None, options=None)
```

Donde sus parámetros de son:

- *fun*: que es la función objetivo a minimizar, potencial en este caso, que acepta un conjunto de variables como entrada y devuelve un escalar, es decir un valor numérico.

- *x0*: valores iniciales para iniciar la búsqueda.
- *args=()*: argumentos adicionales a la función objetivo. Por ejemplo, si el exponente *c* se quiere dejar fijo respetando el coeficiente de Manning de 1,67, el mismo se puede introducir como un argumento manteniendo *c* como un valor fijo durante el ajuste.
- *method*: permite especificar un algoritmo a utilizar para minimizar la función objetivos. Si se indica *None*, es decir, no se asigna ningún método, SciPy asigna el que esté predeterminado. Algunos métodos disponibles son Nelder-Mead, Powell, L-BFGS-B, Newton-CG, etc.
- *jac*: es el jacobiano, función que devuelve la matriz derivadas parciales de primer orden de la función objetivo, se utiliza en el caso que sea solicitado por el método a utilizar.
- *hess*: es el hessiano, función que devuelve la matriz de derivadas de segundo orden a la función objetivo, en caso que sea solicitado por el método a utilizar.
- *hessp*: función que calcula el producto de la matriz Hessiana con un vector dado.
- *bounds*: son los límites superiores e inferiores que se le asigna a cada parámetro de ajuste.
- *constraints=()*: permite definir restricciones adicionales, como por ejemplo, igualdades, desigualdades.
- *tol*: es simplemente la tolerancia, donde se especifica la precisión deseada para el proceso de optimización. A saber, a menor tolerancia, mayor precisión y mejor el ajuste pero implica más tiempo de cálculo con mayor uso de memoria RAM asociada.
- *callback*: es una función de retroalimentación opcional que se ejecuta luego de cada iteración y permite registrar el proceso.
- *options*: son configuraciones adicionales del método de optimización a utilizar como por ejemplo *maxiter*, que permite indicar el número máximo de interacciones, *disp*, que permite mostrar información del proceso, etc.

A continuación, se presenta el fragmento núcleo del script utilizado para el método 5. De igual forma que en el método 3, se cargan los datos de aforos observados, se almacenan en las variables *Altura* y *Caudal* y se especifica la función potencial objetivo a ajustar y las métricas de error a utilizar. Paso siguiente, se define la función *loss()*, función objetivo de minimización con los parámetros a ajustar, la ecuación y el error a calcular. Además se indican los valores iniciales, es decir *x0*, correspondientes a *a=25,41*, *b=-0,43* y *c=1,67* obtenidos por Díaz Losada et al. (2019) para iniciar la optimización y almacenados en *initial\_guess* y los límites para cada cada parámetro de ajuste almacenados en *bounds* con la estructura (mínimo, máximo) para cada uno de ellos.

```
# Función de pérdida (RMSE) a minimizar
def loss(params):
    a, b, c = params
    y_pred = equation(Altura, a, b, c)
    return sqrt(mse(Caudal, y_pred))

# Rango inicial de parámetros [a, b, c] y límites
initial_guess = [25.41, -0.43, 1.67]
bounds = [(7.18, 41.98), # Límite para a
          (-1.05, 1.16), # Límite para b
          (0.98, 2.75)] # Límite para c

result = minimize(loss, initial_guess, method='L-BFGS-B', bounds=bounds)
```

Dentro de `scipy.optimize` también existe el objeto `OptimizeResult` que representa el resultado de la optimización y su estructura tiene distintos atributos que te permiten saber el resultado de la optimización, saber si la misma fue exitosa o no, saber la causa por la cual finalizó, etc. Como se visualiza se busca minimizar la función objetivo indicada en `loss`, de acuerdo los valores iniciales indicados en `initial_guess` con los límites establecidos para los parámetros almacenados en `bounds`, utilizando el método L-BFGS-B.

Sobre la elección del método de optimización, en la documentación teórica de la librería SciPy se informa que existen métodos sin restricciones, minimización limitada, minimización restringida, diferencias finitas, etc. Como se conocen los límites de los parámetros que son representativos del funcionamiento hídrico de la cuenca, se opta por analizar con métodos limitados. Entre los cuales se puede contar con el método de Nelder-Mead, L-BFGS-B, Powell, TNC, etc. El método Nelder-Mead es simplificado y rápido pero no utiliza las derivadas de primer o segundo orden que puede mejorar el rendimiento, TNC necesita del cálculo del jacobiano, por lo cual se decide utilizar el método L-BFGS-B. En la posteridad se puede realizar un estudio comparativo con los resultados obtenidos por distintos métodos, incluso con el uso de redes neuronales.

El método L-BFGS-B (Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno for Box constraints) es un algoritmo de optimización diseñado para resolver problemas no lineales a gran escala con restricciones simples de límites en las variables.

Su objetivo es minimizar una función:

$$\min f(x)$$

Estableciendo restricciones del tipo:

$$l \leq x \leq u$$

Donde  $l$  y  $u$  son los límites inferiores y superiores conocidos para las variables.

De forma resumida, se entiende que el algoritmo utiliza una aproximación de memoria limitada del método quasi-Newton para calcular una matriz que representa el Hessiano de la función objetivo. Esa aproximación del Hessiano requiere un almacenamiento que crece linealmente con el número de variables, lo que lo hace eficiente para problemas de gran escala. Para lograrlo, divide el problema en subproblemas más pequeños, optimizando en el subespacio de las variables libres (aquellas que no están en sus límites), calcula el punto de Cauchy generalizado, que es el punto donde el modelo cuadrático tiene el mínimo en la dirección proyectada del gradiente. Utiliza búsquedas lineales para garantizar una disminución suficiente en la función objetivo y cumplir con las condiciones de curvatura. Puede ser aplicado en problemas de optimización no lineal en campos como el aprendizaje automático, ajuste de modelos y problemas de ingeniería con restricciones simples. Para comprender más sobre este algoritmo se puede consultar Byrd et al. (1994) y Zhu et al. (1997).

Mediante este método se obtiene la siguiente ley:

$$\text{Ley H-Q5: } Q = 12,03(H - 0,26)^{2,75}$$

Es decir que el mejor resultado de la interacción fue con  $a = 12,03$ ,  $b = 0,26$  y  $c = 2,75$ , obteniendo un RMSE de  $3,45 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R^2=0.9833$  y  $\text{EPm}=6,35\%$ . Es decir que se logra un mejor ajuste respecto al método 3.

En la *Figura 5.53.*, se observa la ley H-Q obtenida del ajuste con las respectivas métricas y valores de optimización, en conjunto con los puntos aforados por SNIH, es decir, los valores observados.

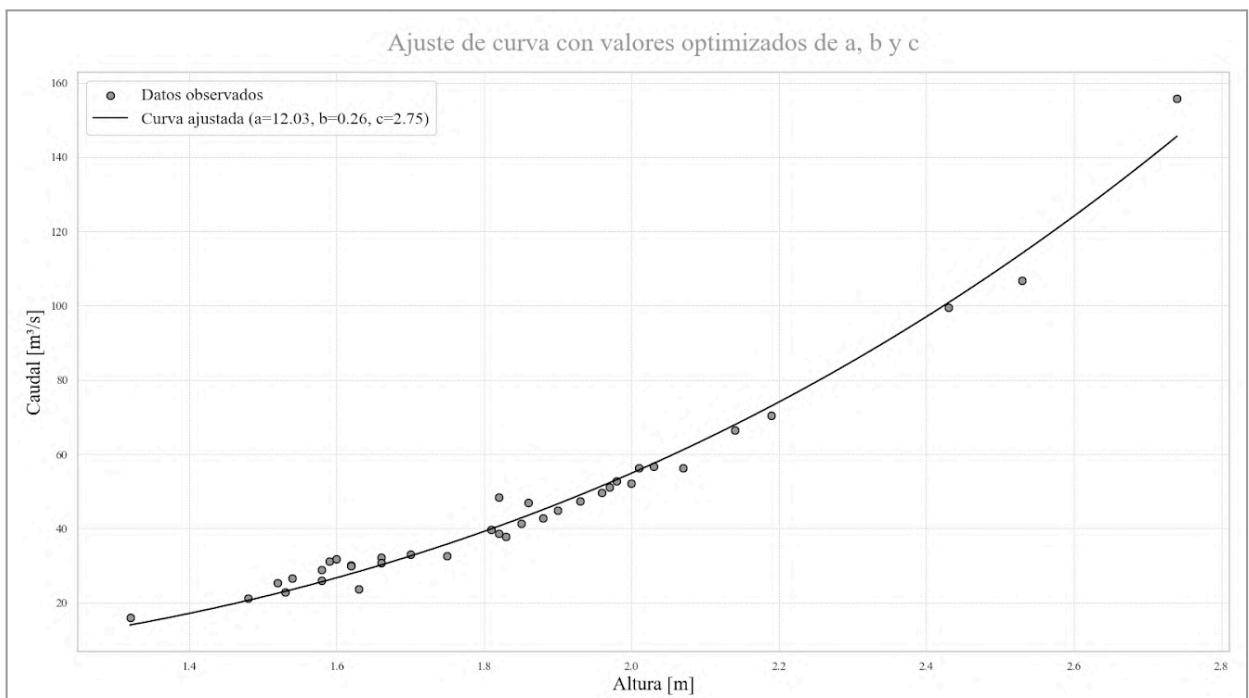


Figura 5.53. Ley H-Q5.

A continuación se presenta en *Tabla 5.27* el resumen de los distintos métodos utilizados y las métricas de ajuste del error obtenidas, y en *Figura 5.54* se presentan las distintas leyes.

Métricas	Ley H-Q1	Ley H-Q2	Ley H-Q3	Ley H-Q Díaz Losada et al. (2019)	Ley H-Q Método L-BFGS-B
EPm [%]	7.34	6.56	9.29	149.31	6.39
R <sup>2</sup>	0.95	0.92	0.98	0.99	0.98
RMSE [m <sup>3</sup> /s]	5.85	7.33	4.33	55.37	3.45

*Tabla 5.27. Resumen métricas obtenidas - Ajuste Ley H-Q, Cruz Alta.*

$$\begin{aligned} \text{LeyH} - Q_1: Q &= 41.97 \cdot (H - 0.81)^{1.67} \text{ [RMSE=5.85 m}^3\text{/s]} \\ \text{LeyH} - Q_2: Q &= 37.63 \cdot (H - 0.77)^{1.67} \text{ [RMSE=7.33 m}^3\text{/s]} \\ \text{LeyH} - Q_3: Q &= 40.71 \cdot (H - 0.82)^{1.92} \text{ [RMSE=4.33 m}^3\text{/s]} \\ \text{LeyH} - Q_4: Q &= 25.41 \cdot (H + 0.43)^{1.67} \text{ [RMSE=55.37 m}^3\text{/s]} \\ \text{LeyH} - Q_5: Q &= 12.03 \cdot (H - 0.26)^{2.75} \text{ [RMSE=3.45 m}^3\text{/s]} \end{aligned}$$

*Figura 5.54. Leyes Altura-Caudal obtenidas para cada método.*

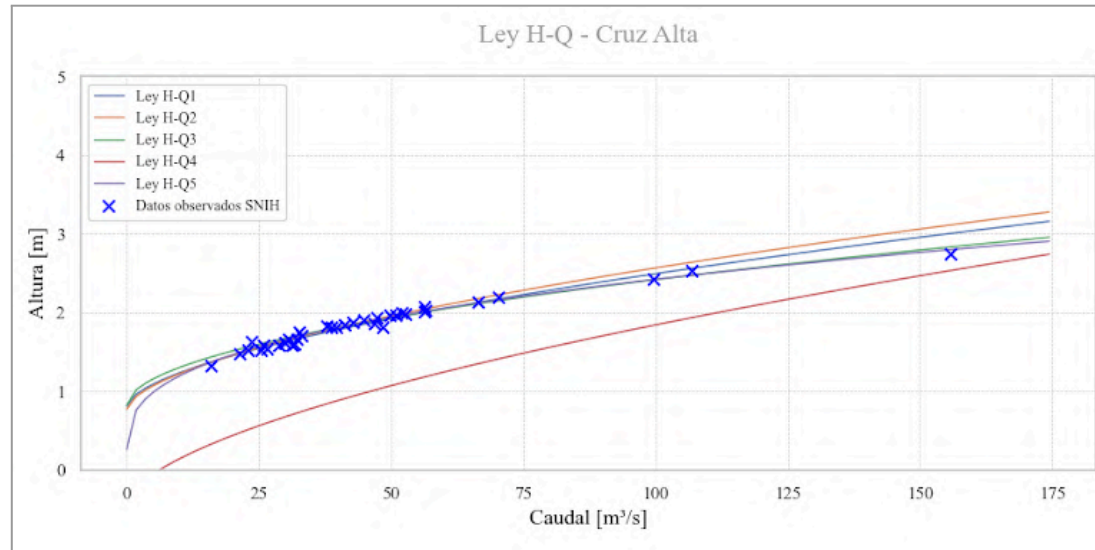


Figura 5.55. Curvas Altura-Caudal obtenidas para cada método.

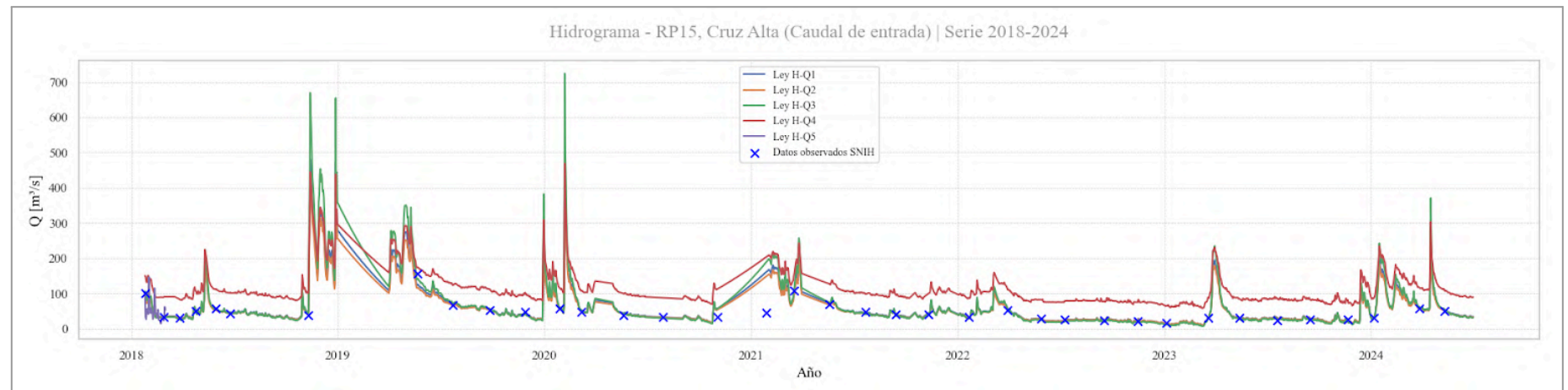


Figura 5.56. Comparación hidrogramas de entrada RP15, Cruz Alta - Serie 2018-2024.

En la *Figura 5.55.*, se presentan las distintas curvas obtenidas en comparación con los datos observados por SNIH, observado que la Ley H-Q5 muestra el mejor ajuste. Además, se observa que la ley desarrollada por Díaz Losada et al. (2019) presenta una tendencia similar pero desfasada, es decir, con grandes desviaciones respecto a los valores observados, lo cual genera un RMSE elevado. Esto se puede explicar en principio porque las secciones de aforo del SNIH y la de Díaz Losada et al. (2019) son cercanas pero distintas, no son la misma, y también SNIH no cuenta con los aportes realizados por el Arroyo Las Mojarras, aguas abajo de la sección utilizada, como se puede visualizar en *Figura 5.57.*



*Figura 5.57. Ubicación de secciones de aforo.*

Por último, se presenta de la *Figura 5.56.*, el hidrograma de entrada en RP15, Cruz Alta correspondiente a la serie 2018-2024, utilizando las distintas leyes obtenidas. Como variable independiente en cada fórmula se utilizan las alturas hidrométricas relevadas por SNIH en el mismo período.

Se observa nuevamente el mejor ajuste correspondiente a la H-Q5 y el desplazamiento del hidrograma que utiliza la ecuación de Díaz Losada et al. (2019), lo que demuestra que son secciones diferentes, por lo cual la altura del flujo es distinta, ambas secciones se pueden visualizar en *Figura 5.58.*



Figura 5.58. SNIH, Puente calle Malvinas Argentinas (Izq.) - Díaz Losada et al. (2019), Puente RP15 (Der.).

Terminado el análisis de la sección de entrada, resulta también de interés el estudio de la sección ubicada en Pueblo Andino, en el puente de acceso a la localidad, *Figura 5.59*, debido a que la misma representa un punto de comparación con gran cantidad de valores observados.



Figura 5.59. Sección de aforo en Pueblo Andino.

Según Díaz Losada et al. (2019), se dispone con la siguiente ley:

$$Q = 24,20(H - H_{Q0})^{1,67}$$

Donde:

- $H_{Q0} = -0,77$  m.
- $H$  expresado en metros [m].

- $Q$  expresado en metros cúbicos por segundo [ $m^3/s$ ].

La misma se puede observar graficada en la Figura 5.60.

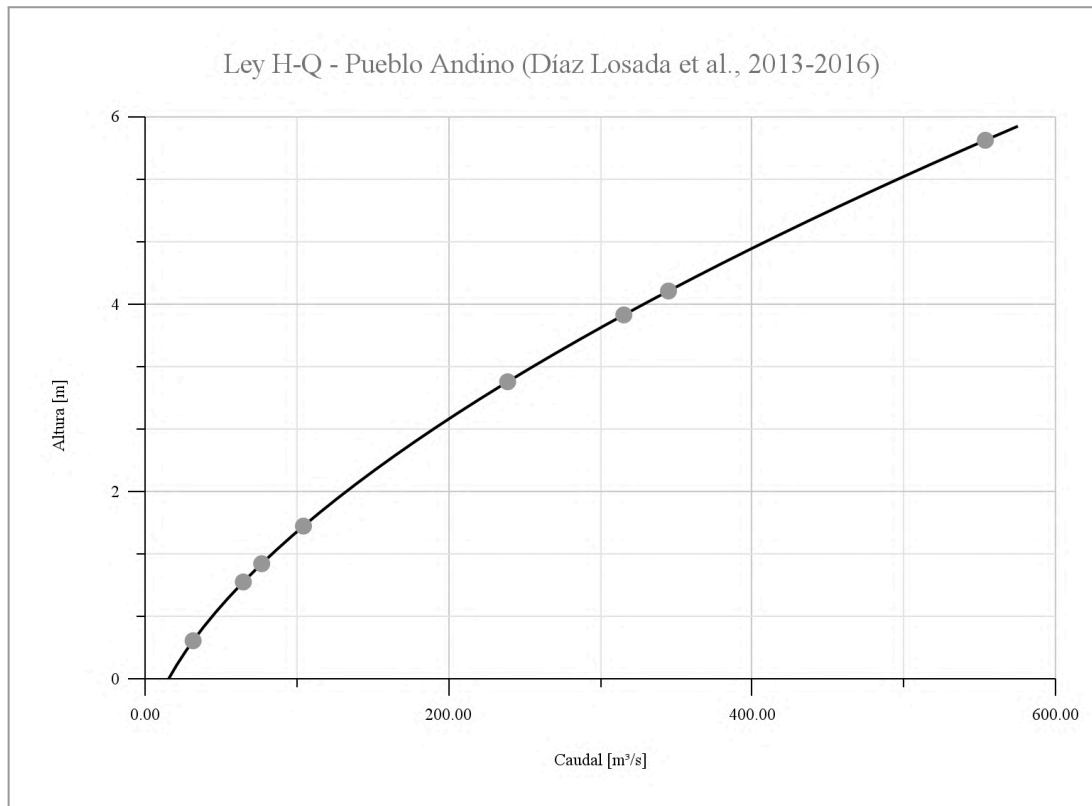


Figura 5.60. Ley H-Q, Pueblo Andino (Díaz Losada et al., 2013-2016).

Debe observarse que ley H-Q de Pueblo Andino se ajusta solo hasta caudales escurridos del orden de 550  $m^3/s$ , el cual es el máximo observado durante la campaña, lo cual, si se compara con los datos observados en la estación 3223 - Pueblo Andino del SNIH pertenecientes a la serie histórica desde el 28 de julio de 1983 hasta el 21 de mayo de 2024, se encuentra que existen cuatro valores de caudales que superan ese límite y corresponden a eventos extraordinarios:

- 01/03/1984 -  $Q = 941,58 m^3/s$  -  $H = 10,36 m$
- 02/03/1984 -  $Q = 1002,90 m^3/s$  -  $H = 10,18 m$
- 29/02/1996 -  $Q = 659,82 m^3/s$  -  $H = 6,55 m$
- 13/03/2015 -  $Q = 892,49 m^3/s$  -  $H = 10,16 m$

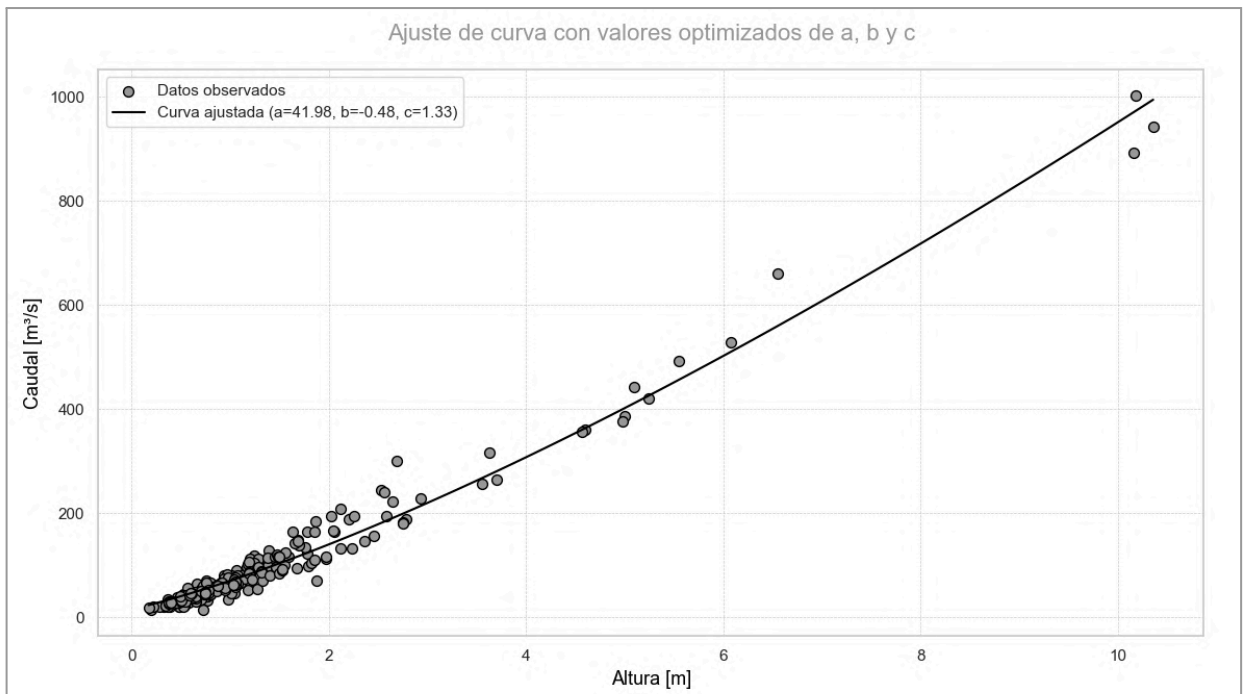
Entonces, utilizando el método 5 empleado para construir la ley H-Q en la sección de entrada, con los datos de aforo realizado para el SNIH en Pueblo Andino, se ajusta una nueva ley para dicha sección.

Mediante este método se obtiene la siguiente ley:

$$\text{Ley H-Q5: } Q = 41,98(H - (-0,48))^{1,33}$$

Es decir que el mejor resultado de la interacción fue con  $a = 41,98$ ,  $b = 0,48$  y  $c = 1,33$ , obteniendo un RMSE de  $20,32 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $R^2=0.9744$  y  $\text{EPm}=20,37\%$ . Es decir que se logra un mejor ajuste respecto a Díaz Losada et al. (2019), el cual cuenta con RMSE de  $46,70 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $\text{EPm}=17,45\%$ .

En la *Figura 5.61.*, se observa la ley H-Q obtenida del ajuste con las respectivas métricas y valores de optimización, en conjunto con los puntos aforados por SNIH, es decir, los valores observados.



*Figura 5.61. Ley H-Q, Pueblo Andino.*

Si se utiliza la ley H-Q de Díaz Losada et. al. (2019), el RMSE es de  $46,70 \text{ m}^3/\text{s}$ , debido a que no está prediciendo correctamente caudales superiores a  $550,00 \text{ m}^3/\text{s}$ , los sobrevalora.

Para los alcances de este proyecto se toman como válidas ambas leyes, utilizándose para comparar con los datos de salida del modelo, en la sección de comparación de Pueblo Andino. En otra ocasión se puede realizar un análisis estadístico de distribución de probabilidades y analizar la confianza de usar la ecuación potencial de ajuste.

### Método alternativo

Idealmente lo más preciso es contar con datos observados en toda la serie de estudio, pero no es lo que ocurre habitualmente. Ante ello, existen otros métodos para obtener los datos necesarios de entrada, caudales diarios en este caso. Uno de los mismos es el utilizado en el trabajo de investigación que dio origen a este proyecto, Romagnoli et al. (2017), en donde no se conocía ningún aforo en la sección de entrada a la cuenca y solo contaban con datos mensuales de precipitación por lo cual, buscaron la forma de generar ese dato.

El procedimiento se basa en el planteo de una ecuación de balance hídrico mensual entre la precipitación y la variación del flujo de agua, teniendo en cuenta a través del coeficiente de escorrentía  $C$ , los efectos de almacenamiento en el suelo, infiltración y evapotranspiración.

Resultando:

$$Q_{in} = Q_{out} - C \frac{P \Omega}{86400}$$

Donde:

- $Q_{in}$ : Caudal de entrada mensual en la sección RP15, Cruz Alta en  $m^3/s$ .
- $Q_{out}$ : Caudal de salida mensual observado en Pueblo Andino en  $m^3/s$ .
- $C$ : Coeficiente de escorrentía.
- $P$ : precipitación mensual en mm.
- $\Omega$ : área de la cuenca entre la sección en RP15 y Pueblo Andino en  $km^2$ .

Respecto al coeficiente de escorrentía  $C$ , por lo general, un aumento de la precipitación anual produce una reducción de infiltración, es decir, el almacenamiento en el suelo se acerca al punto teórico de saturación, eso implica el aumento de escurrimiento superficial y un aumento del coeficiente de escurrimiento  $C$  a nivel anual. Bertoni y Ganancias (2010) estudiaron la relación entre el volumen de flujo de agua anual y la precipitación anual en un subcuenca de 598,00  $km^2$  del Río Ctalamochita (o Tercero) de la provincia de Córdoba, el cual es uno de los principales afluentes del Río Carcarañá, para el período 1993-2002. Mediante este estudio surge una ecuación lineal que ajusta a la tendencia media observada:

$$C = 0,0002 \sum_{i=1}^{12} P_i + 0,205$$

Cabe destacar que el coeficiente de escorrentía  $C$  es menor en períodos secos que en períodos húmedos, para el período analizado 2014-2024, el mismo varía entre 0,34 y 0,46.

Para los datos de precipitación se utilizaron los brindados por la estación virtual E1 de NASA POWER, estación más cercana a Oliveros en la sección de cierre de la cuenca, para realizar el mismo método utilizado por Romagnoli et al. (2017), en donde se usa la estación virtual E1 pero del conjunto de datos meteorológicos globales de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) global meteorological dataset (Dile and Srinivasan, 2014; Fuka et al., 2014). Y se considera una cuenca de 3200  $km^2$  de superficie en coincidencia con el procedimiento mencionado.

Procesando los caudales mensuales obtenidos mediante esta metodología, se construye el hidrograma de entrada en RP15, Cruz Alta, Figura 5.62.

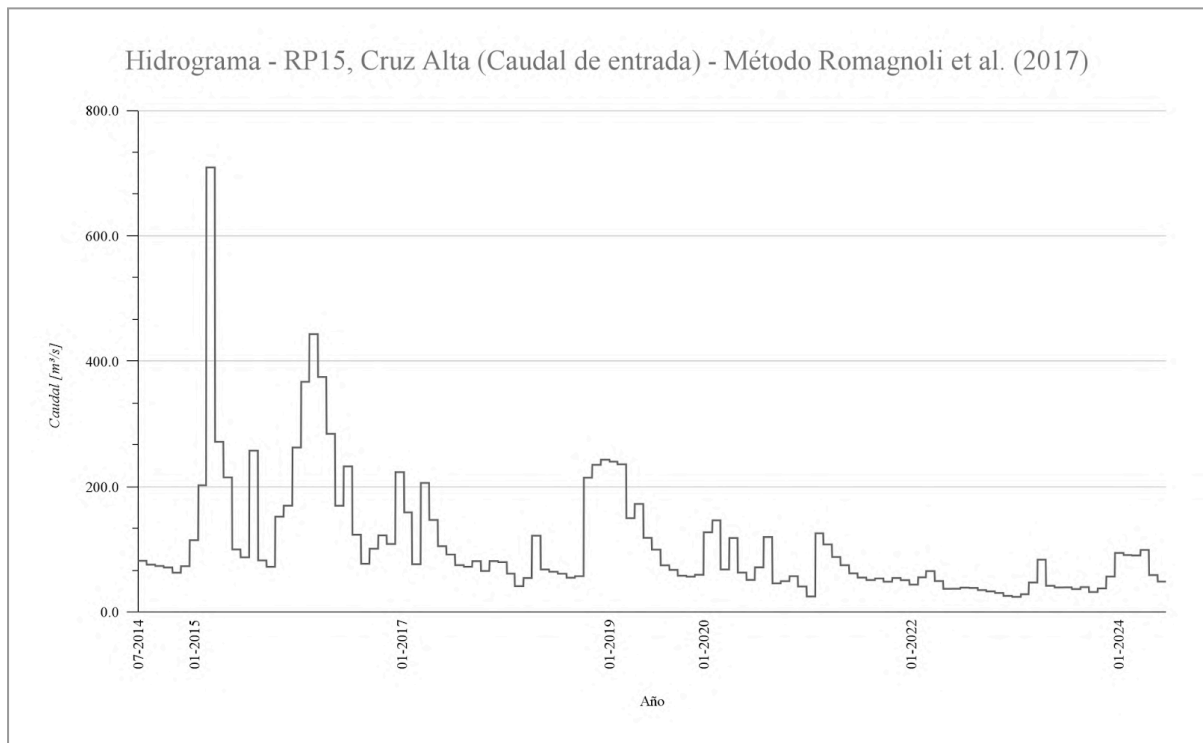


Figura 5.62. Hidrograma de entrada RP15, Cruz Alta - Serie 2014-2024 - Método Romagnoli et al. (2017).

A continuación se superponen los hidrogramas de entrada obtenidos de acuerdo a ambas metodologías desarrolladas, Figura 5.63.

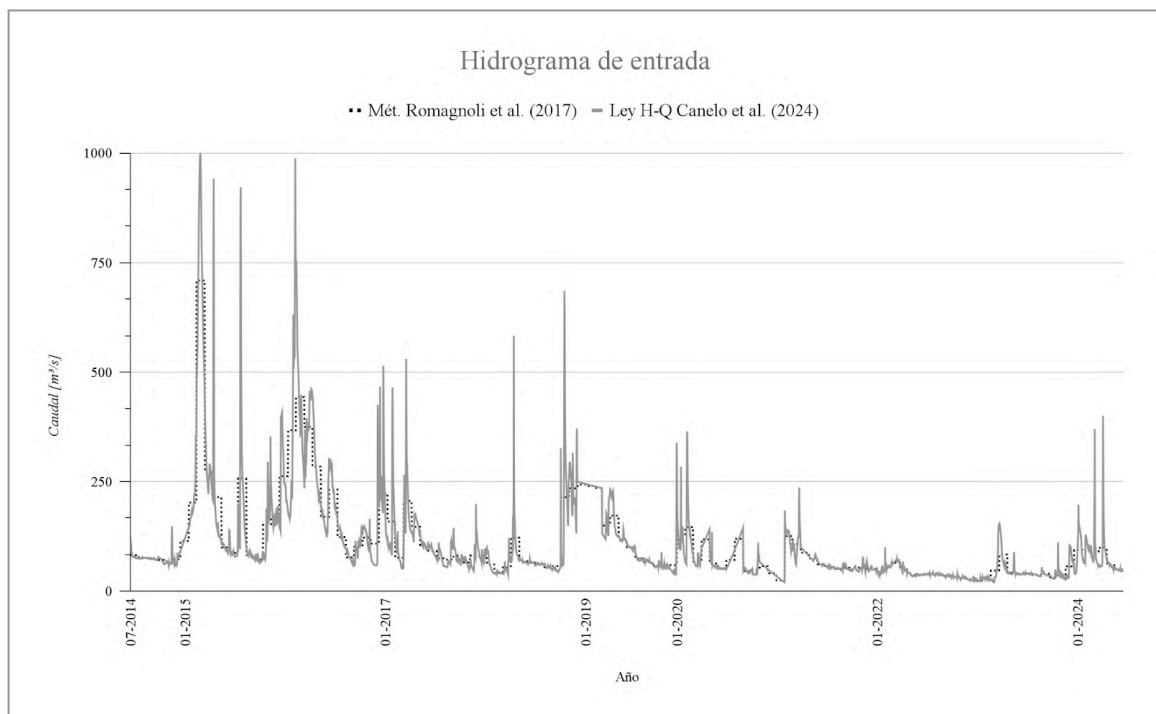


Figura 5.63. Hidrogramas de entrada al modelo SWAT. Metodología Romagnoli et. al. (2017): paso mensual.  
Metodología Canelo et. al. (2024): paso diario.

Desde acá en adelante se denomina M1 a la metodología de obtención de caudales diarios desarrollada en este proyecto y M2 a la metodología de obtención de caudales de entrada mensuales aplicando una ecuación de balance de acuerdo a Romagnoli et al. (2017).

En primer lugar, analizando solo gráficamente se puede concluir:

- Se puede observar que M2, al utilizar valores mensuales, no tiene sensibilidad a las variaciones diarias, por ello las rectifica en un promedio mensual, eso explica la forma escalonada del hidrograma.
- La mayor diferencia se observa en eventos de crecidas extraordinarias, es decir caudales máximos, por ejemplo en el año 2015, donde se logra una mayor representación de dicho evento con M1.
- M2 no representa correctamente caudales altos.
- A partir de 2018, ambos métodos tienden a estabilizarse en valores de caudal más bajos, con fluctuaciones menos pronunciadas.
- M2 parece ajustarse bien a las tendencias a largo plazo y caudales bajos y medios.
- M1 representa las variaciones diarias, se ajusta a caudales bajos, medios y altos.

Luego de establecer esta orientación inicial, se comparan ambos métodos con algunas de las métricas mencionadas anteriormente, *Tabla 5.28*.

<i>Caudales M1-M2</i>	
Métricas	
NS	0.68
RMSE [m <sup>3</sup> /s]	54.04

*Tabla 5.28. Métricas comparación caudales de entrada.*

De acuerdo a las métricas evaluadas, se comprende que el error relativo promedio de 54,04 m<sup>3</sup>/s es alto, es decir que el método M2 no está prediciendo correctamente los valores observados, esto se debe principalmente al evento de 2015 con caudales altos, si se extrae ese año de la serie, el error relativo promedio se reduce a por lo menos la mitad.

Igualmente un NS = 0.68 indica que el resultado de utilizar M2 es aceptable.

Respecto al error relativo promedio obtenido, se debe tener en cuenta también que entre las variables de entrada y salida de la cuenca existe, por lo general, un cierto comportamiento hidrológico no lineal, por ejemplo, la relación no lineal entre la precipitación P y el escurrimiento Q depende del almacenamiento, el cual a su vez depende del tamaño y las características fisiográficas (formas que presenta el relieve, identificadas y definidas a partir del análisis integral de la información topográfica, geológica, hidrológica

y edafológica) de la cuenca, y de la evapotranspiración. Esto y la presencia de eventos extremos en la serie de análisis lleva a alcanzar ese valor.

#### 5.2.4. Tipo de suelo (Romagnoli et. al., 2017)

Los datos de entrada del tipo de suelo son los utilizados para la conformación del modelo SWAT que abarca el periodo 1998-2015, a continuación se describe la metodología llevada a cabo por la Dra. Ing. Margarita Portapila y el Dr. Ing. Martín Romagnoli para obtener estos datos.

La información acerca del tipo de suelo es suministrada por el INTA, quien en la década de 1960 llevó a cabo un Plan Mapa de Suelos de la Región Pampeana, elaborando mapas de suelo de esta región a escala 1:50.000. Sin embargo, actualmente estos mapas se encuentran digitalizados en escala 1:500.000, debiendo entonces, en primer lugar, crear la versión digital de los mismos a escala 1:50.000. La totalidad del área fue cubierta mediante 8 mapas: Cañada de Gómez y Rosario (3360-13 y 14), Berabevú (3363-30), Melincué (3360-25), Totoras y Serodino (3360-7 y 8), Cruz Alta (3363-24), Casilda (3360-19), Maizales (3363-24) y Marcos Juárez (3363-17). Luego, cada mapa fue escaneado con el objeto de elaborar el mapa de la Cuenca Baja del Río Carcarañá, mediante el cual se efectúa la vectorización de la totalidad del mapa de suelo, que permita su ingreso al sistema GIS. Estos mapas elaborados por el INTA contienen información respecto a la textura del suelo para nueve capas de suelo, tanto la profundidad de cada capa, el contenido de materia orgánica, el tamaño de las partículas y su granulometría son provistas por campañas de relevamiento llevadas a cabo también por el INTA, en el año 1988. Mientras que, la densidad aparente, el contenido de agua y la conductividad hidráulica saturada se estiman utilizando *pedotransfer functions* (funciones de transferencia edafológica), que son funciones que, a partir de datos del suelo que son de simple obtención o de conocimiento, como es el caso de la textura, permiten estimar otras variables que su conocimiento conlleva una complejidad, como es el caso de la conductividad hidráulica saturada. Se presenta en la *Figura 5.64.* el mapa de suelos que se ingresa al modelo.

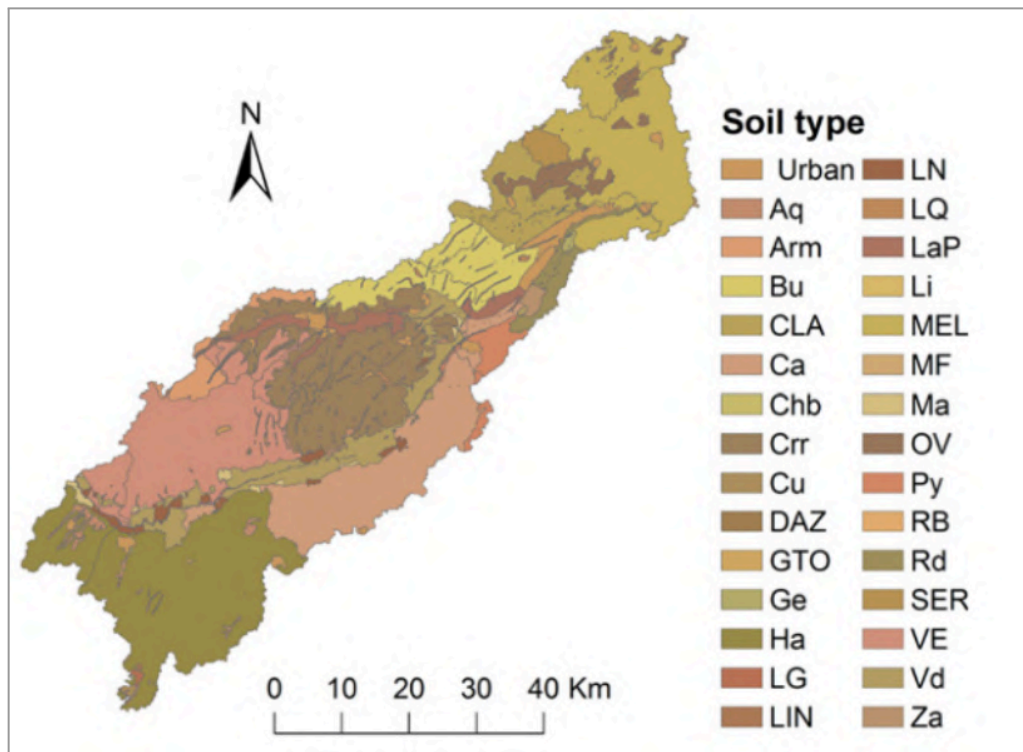


Figura 5.64. Tipos de suelos introducidos al modelo por Romagnoli et. al. (2017)

### 5.2.5. Cuenca

En un primer lugar se realiza una breve descripción de conceptos básicos para comprender cómo se realizó el modelo de la cuenca. Para ello se busca un modelo digital de elevación del sitio en estudio (MDE) el cual se descarga de la página oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN). El MDE es una representación digital de la topografía basada en una sola elevación que representa todo el área del sector en estudio, se basa en datos ráster (datos de cuadrícula uniformemente espaciados, los cuales contienen valores para la altura de una entidad o sitio referenciado a un dato vertical en común), con una cierta resolución (tamaño de los píxeles), en este caso los datos descargados tienen una resolución de 30x30m en las direcciones X e Y, y cada celda/píxel contiene un único valor de elevación Z.

Luego, para éste contexto hidrológico y la gestión de cuencas, se utiliza el software QGIS (Quantum GIS), el cual es un sistema de información geográfica de código abierto que permite la visualización, análisis y procesamiento de datos espaciales.

A continuación se muestran los distintos pasos para poder llegar al resultado final del modelo:

- Descarga de los MDE con píxeles de tamaño 30x30m desde la página del IGN:  
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>.

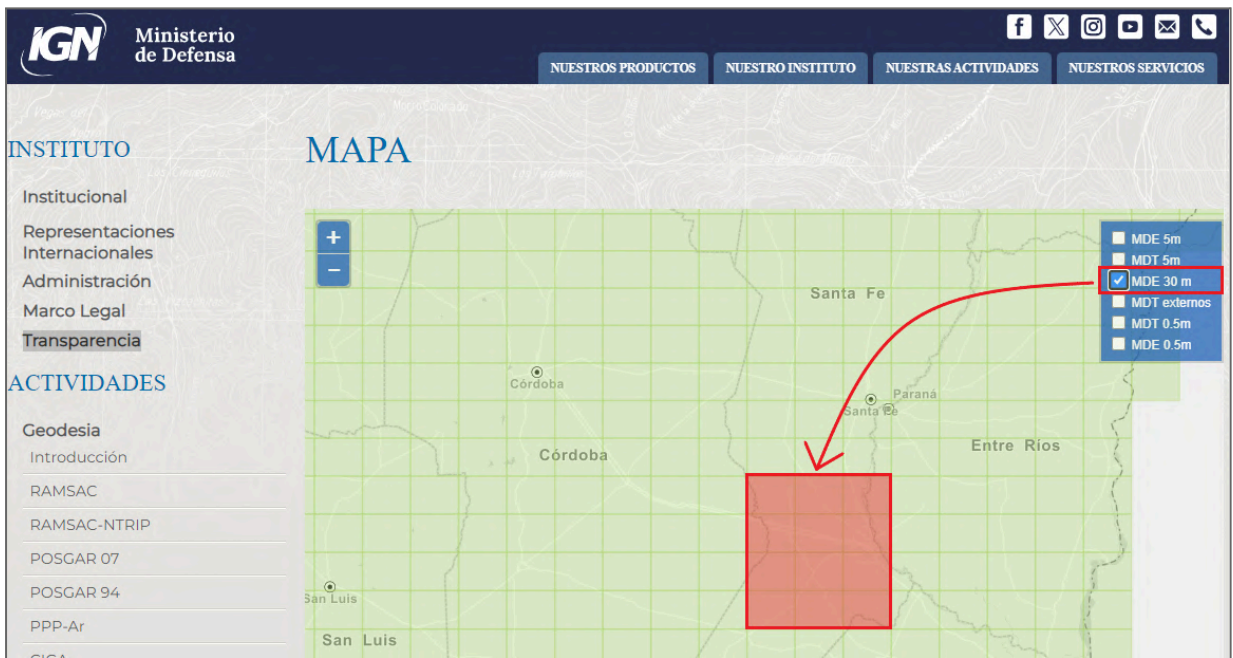


Figura 5.65. Descarga de los MDE en la página del IGN.

Nota: “Se hace mención a que los MDE corresponden a la versión 2.1 del año 2021 a diferencia de los utilizados por el Ing. Franco Trivisono que son de la versión 1.0 del año 2016. Esta versión según documentación técnica del IGN: se detectó inconsistencias adicionales a lo largo del territorio nacional. Debido a esto, el IGN llevó a cabo un proceso de corrección para minimizar estos ruidos, dando origen a esta nueva versión 2.1. Link de acceso a la documentación técnica: [https://www.ign.gov.ar/archivos/Informe\\_MDE-Ar\\_v2.1\\_30m.pdf](https://www.ign.gov.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.1_30m.pdf)”.

- Luego se deben unir los distintos MDE para poder generar una continuidad entre cada uno. Para ello se utiliza la herramienta dentro del QGIS llamada combinar raster:

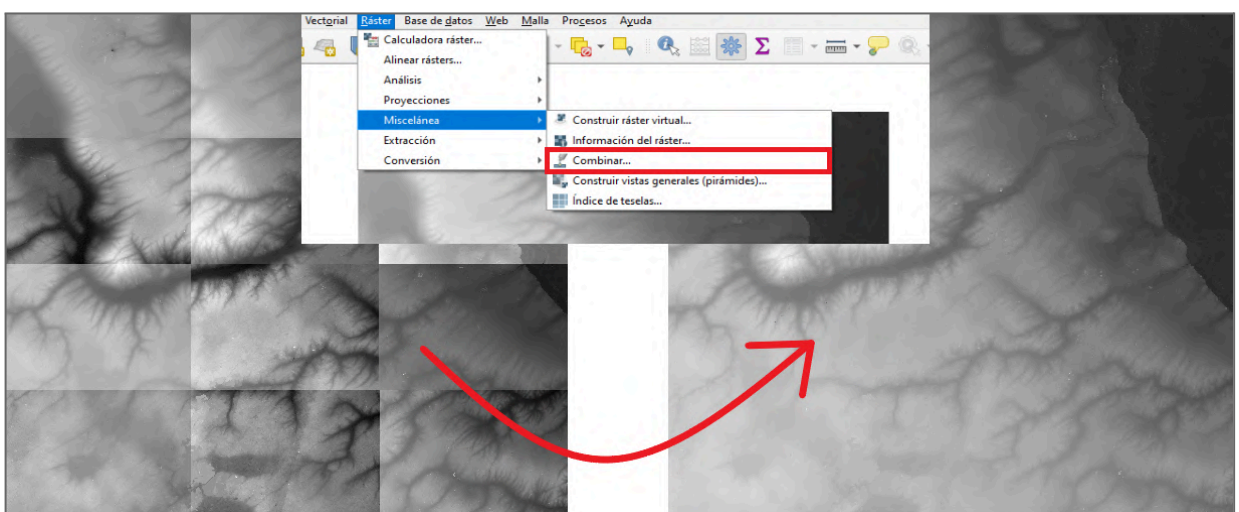


Figura 5.66. Combinar MDE en QGIS.

- Debemos de reproyectar el DEM del sistema geográfico en el que fue descargado (WGS 84) a un sistema de referencia geodésico nacional (POSGAR 2007: posiciones geodésicas Argentinas) en la zona en que se encuentra la cuenca del Carcarañá, la cual sería la Zona 5. Para ello utilizamos la herramienta de QGIS proyecciones.
- Luego, se corrige el DEM para eliminar errores y depresiones que ocurren con interferencias en la onda del satélite. Para ello se usa un complemento de SAGAGIS llamado fill sinks XXL (Wang & Liu), el cual detecta estos errores y otorga a dicha celda el valor promedio de las celdas cercanas a la misma.
- Se trazan las redes de drenaje de la cuenca utilizando el complemento de SAGAGIS llamado Channel Network and Drainage Basins. Con un umbral de 7 (a menor umbral, se genera una red más densa, éste parámetro depende fundamentalmente de la extensión en área de la cuenca, para este caso el valor de 7 representa una densidad de drenaje lo más real posible):

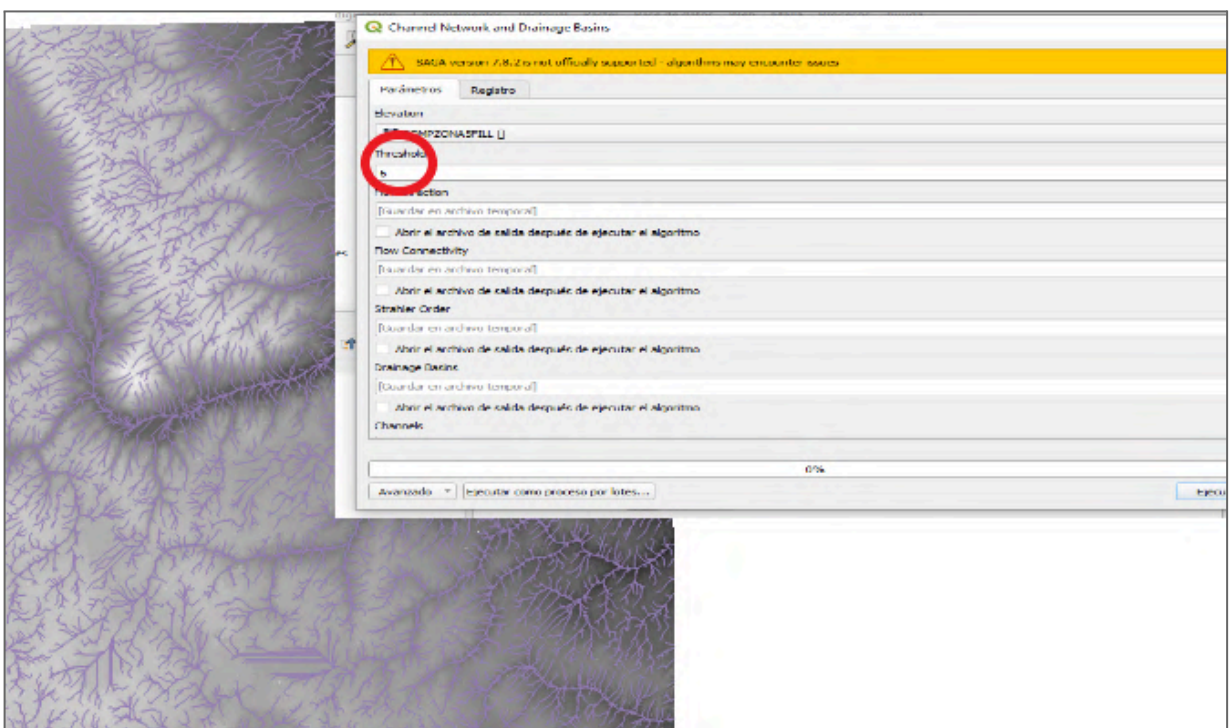


Figura 5.67. Determinación de las redes de drenaje con SAGAGIS.

- Se delimita la cuenca, identificando el “punto de fogueo” o punto de cierre de la cuenca, el cual en este caso se encuentra en el Puerto Gaboto en la confluencia del Río Carcarañá con el Río Coronda (brazo del Río Paraná), y utilizando otro complemento de SAGAGIS llamado UpslopeArea:

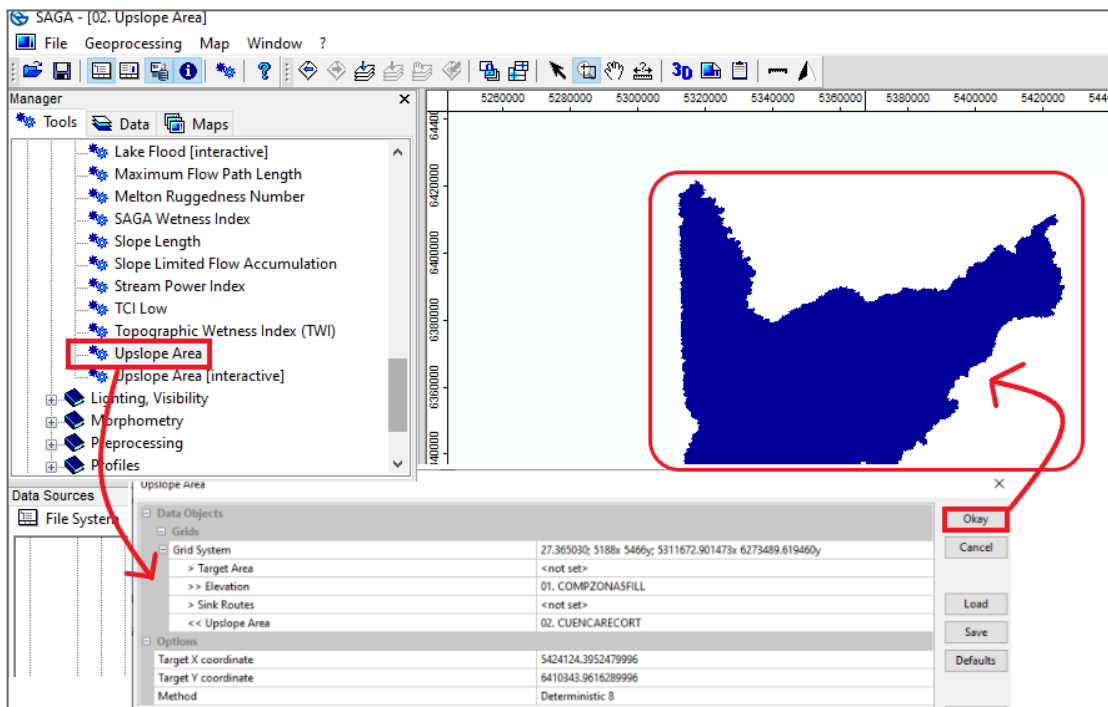


Figura 5.68. Delimitación de la cuenca con SAGAGIS.

- Se transforma la delimitación de la cuenca de formato ráster a formato vectorial:

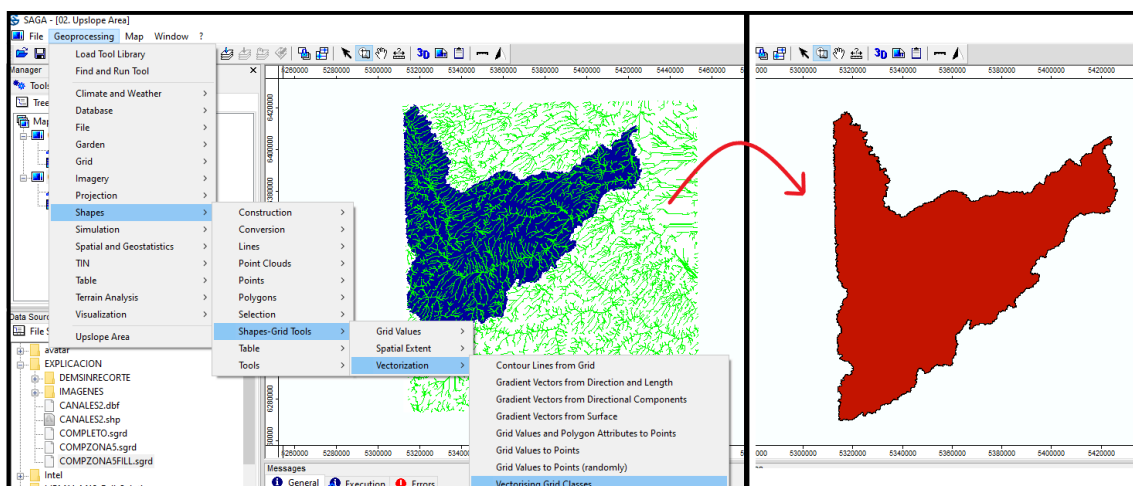


Figura 5.69. Delimitación de la cuenca con SAGAGIS.

Nota: cabe destacar que la cuenca delimitada comprende también la cuenca del arroyo Tortugas, el mismo queda fuera del estudio del presente trabajo. Por ello se realiza el mismo procedimiento de delimitación de la cuenca del arroyo Tortugas individualmente y luego se recorta a la cuenca total para obtener la llamada cuenca baja del Río Carcarañá”.

- Se recorta el MDE con la delimitación de la cuenca en el formato vectorial transformado anteriormente.

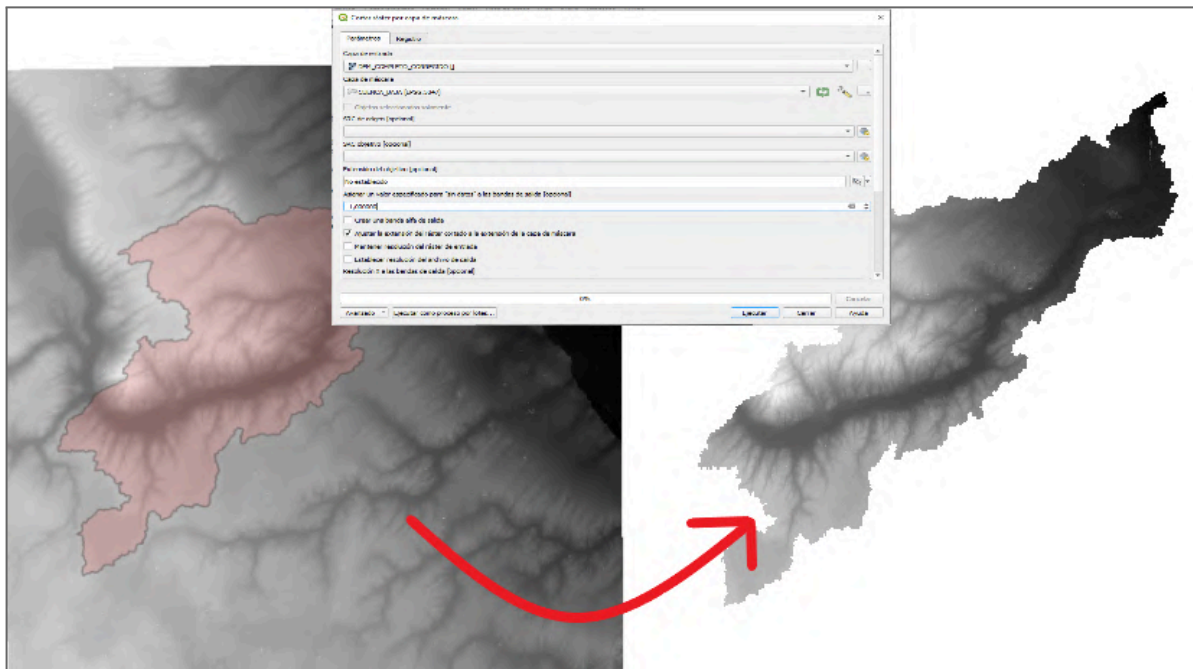


Figura 5.70. Recorte del MDE con QGIS.

Nota: “Se realiza el mismo procedimiento con el archivo vectorial correspondiente a canales, obteniendo así un conjunto de datos vectoriales con canales recortado para la cuenca baja”.

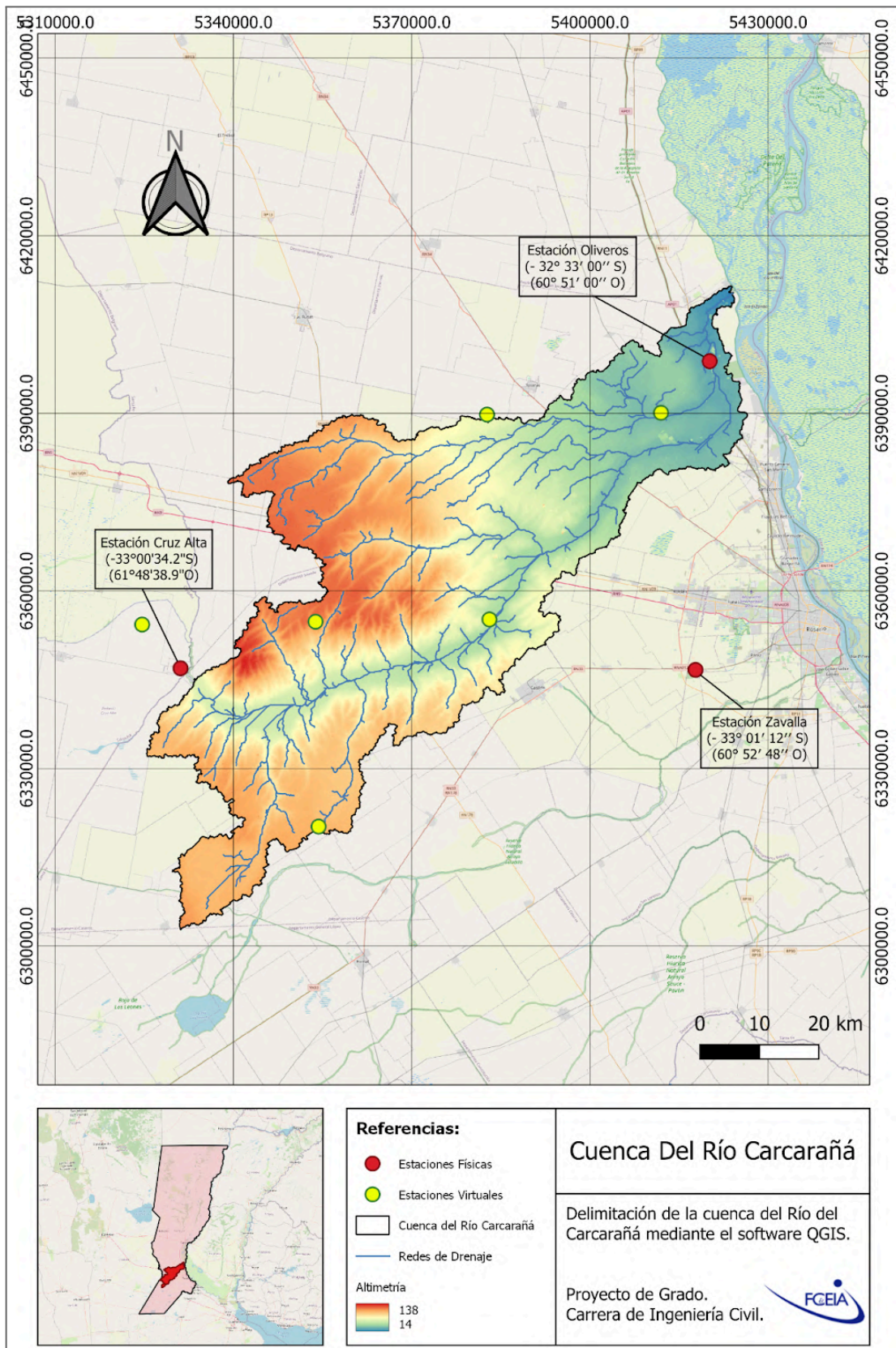


Figura 5.71. Delimitación de la cuenca del Río Carcarañá mediante el software QGIS.

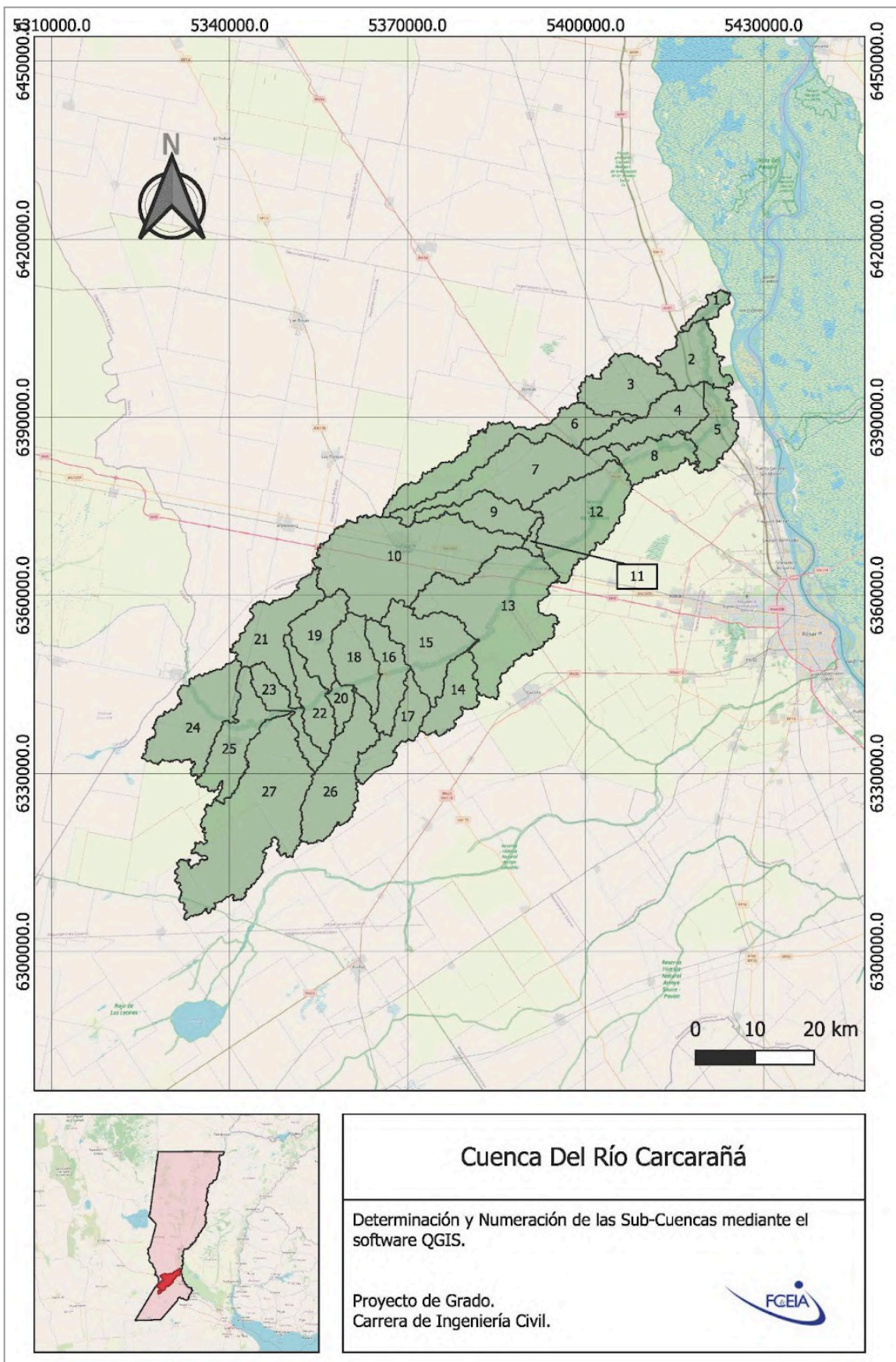


Figura 5.72. Delimitación de subcuencas.

Observando las *Figuras 5.71.* y *5.72.*, se puede observar una diferencia en la delimitación de la cuenca, en las cercanías de las subcuencas 10 y 6, esto es debido a que los planos utilizados para la confección de cada uno resultan versiones diferentes, provocando que el software GIS altere la frontera de la cuenca. La primera imagen resulta de la aplicación de la secuencia de confección de la cuenca por parte del presente grupo de trabajo, mientras que la otra es la que obtiene el Ing. Franco Trivisonno en su tesis doctoral.

Una vez que el MDE se ingresa al software SWAT y se realiza el procesamiento, el mismo software divide a la cuenca en subcuencas, en función de la topografía, red de drenaje, puntos de vuelco, entre otras condiciones internas del programa. También permite que el usuario pueda especificar manualmente los puntos de cierre donde desee dividir la cuenca en subcuencas. Como idea simplificada, se debe entender que toda el área de la subcuenca fluya hacia la sección de salida de la misma.

Esta división de la cuenca en subunidades es uno de los primeros pasos para configurar la simulación. Para definir las subcuencas, SWAT permite un número ilimitado de Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRUs) por subcuenca, con el requisito de que por lo menos exista uno dentro de la misma.

Para esta escala de división a nivel de subcuenca, cada una tiene una determinada ubicación geográfica dentro de la cuenca y, entre las mismas, están espacialmente relacionadas, es decir, existe continuidad (Por ejemplo, referido al presente proyecto, el flujo que escurre por la sección de cierre en la subcuenca 8, aguas arriba, es el mismo flujo en la sección de entrada de la subcuenca 5, inmediatamente aguas abajo).

Para conocer, existe una escala más pequeña en la que puede dividirse una subcuenca, que son los HRUs, los cuales se los puede entender como pequeñas porciones de una subcuenca que poseen atributos únicos de uso, gestión, suelo, pendiente, etc.

Para el caso de la Cuenca Baja del Río Carcarañá (CBRC), SWAT subdivide a la misma en 27 subcuencas (*Figura 5.72.*), asignándoles una serie de parámetros que permiten su caracterización, los cuales se presentan en la *Tabla 5.29.*

Sub.	Área	Slo1	Len1	Sll	Csl	Wid1	Dep1	Lat	Long_	Elev	ElevMin	ElevMax
1	1926,81	3,70	12625,10	91,44	0,21	7,61	0,42	-32,46	-60,84	20,99	4	40
2	8628,30	3,49	18552,85	91,44	0,16	18,71	0,77	-32,54	-60,87	30,49	11	56
3	11363,22	2,67	19090,02	91,44	0,07	22,07	0,86	-32,58	-60,99	37,94	28	59
4	10254,15	2,75	31536,52	91,44	0,07	20,76	0,83	-32,63	-60,94	36,22	22	65
5	7557,03	3,00	24642,37	91,44	0,04	17,28	0,73	-32,65	-60,84	30,94	14	52
6	16528,23	2,76	60792,08	91,44	0,13	27,64	1,00	-32,72	-61,32	65,20	30	119
7	19896,57	2,56	56738,26	91,44	0,14	30,89	1,08	-32,71	-61,18	62,86	31	115
8	7412,13	3,01	19608,19	91,44	0,13	17,08	0,73	-32,69	-60,94	36,49	21	73
9	7796,07	2,61	29323,98	91,44	0,18	17,61	0,74	-32,77	-61,24	71,70	49	109
10	36549,36	2,87	47772,98	91,44	0,15	44,50	1,38	-32,84	-61,40	96,48	49	134
11	1082,16	2,44	10804,84	91,44	0,23	5,38	0,34	-32,81	-61,16	55,22	41	73
12	19253,16	2,59	30365,30	91,44	0,13	30,29	1,07	-32,78	-61,08	49,58	25	79
13	30975,03	2,74	35096,99	91,44	0,12	40,29	1,29	-32,92	-61,23	67,72	35	120
14	7288,02	2,63	23539,65	91,44	0,22	16,91	0,72	-33,05	-61,31	79,92	44	104
15	13432,59	2,81	28219,65	91,44	0,27	24,41	0,92	-32,97	-61,35	75,08	39	129
16	7958,52	2,73	18008,96	91,44	0,28	17,83	0,75	-33,02	-61,43	79,97	46	127
17	7768,53	2,54	26383,62	91,44	0,17	17,57	0,74	-33,10	-61,41	88,45	48	110
18	8624,07	2,79	24214,18	91,44	0,31	18,71	0,77	-32,99	-61,48	82,81	48	136
19	8812,17	2,92	23911,34	91,44	0,28	18,95	0,78	-32,96	-61,55	99,86	52	136
20	2588,04	2,74	12409,22	91,44	0,36	9,09	0,48	-33,06	-61,51	75,02	50	101
21	12877,38	2,79	35596,33	91,44	0,18	23,80	0,91	-32,95	-61,62	109,27	53	141
22	7084,62	2,69	22313,00	91,44	0,29	16,63	0,71	-33,05	-61,56	76,92	51	122
23	5941,89	2,72	16340,83	91,44	0,46	14,96	0,67	-33,07	-61,61	84,19	53	136
24	16597,35	2,70	26618,47	91,44	0,17	27,71	1,00	-33,08	-61,77	88,60	51	140
25	11484,81	2,76	26936,38	91,44	0,20	22,22	0,87	-33,11	-61,70	86,35	52	140
26	15266,97	2,39	37494,68	91,44	0,14	26,35	0,97	-33,17	-61,52	95,11	50	115
27	38562,21	2,46	55167,05	91,44	0,10	45,95	1,41	-33,23	-61,68	97,01	51	119

Figura 5.29. Características de las subcuencas generadas por SWAT.

Donde:

- **Sub.:** identificación numérica de la subcuenca.
- **Área:** área de la subcuenca expresada en hectáreas [ha].
- **Slo1:** pendiente de la subcuenca expresada en porcentaje [%].
- **Len1:** longitud del tramo más largo dentro de la subcuenca, expresada en metros [m].
- **Sll:** longitud efectiva de la pendiente del terreno expresada en [m], es decir, la distancia que recorre el flujo superficial desde el punto más alto de la subcuenca hasta el punto de cierre.
- **Csl:** pendiente del tramo tributario de la subcuenca expresada en porcentaje [%].
- **Wid1:** ancho del tramo tributario de la subcuenca, expresado en metros [m].
- **Dep1:** profundidad del tramo tributario de la subcuenca, expresado en metros [m].
- **Lat:** latitud del centroide de la subcuenca.
- **Long\_:** longitud del centroide de la subcuenca.
- **Elev:** elevación de la subcuenca expresa en metros [m], la cual por defecto es la elevación promedio, como en el caso del presente proyecto, sino se puede indicar la elevación del centroide.
- **ElevMin:** elevación mínima dentro de la subcuenca.
- **ElevMax:** elevación máxima dentro de la subcuenca.

Como es de conocimiento, el área en estudio se encuentra ubicada en una zona de llanura, pero a su vez, para poder analizar las subcuencas y en particular el suelo, se puede realizar la discretización del relieve entre *loma*, *media loma* y *bajo*.

El objetivo de esta clasificación es agrupar subcuencas con similares características de pendiente y elevación media, para complementar el análisis de las problemáticas, seguir comprendiendo el funcionamiento del sistema hidrológico en estudio y generar un mapa de acuerdo a esta clasificación para la subcuenca. Para ello, se establece de acuerdo a la *Tabla 5.29*, las pendientes y elevaciones medias, mínimas y máximas absolutas del área en estudio, como se puede observar en *Tabla 5.30*.

<i>Parámetro</i>	<i>Pendiente [%]</i>	<i>Elevación media [m]</i>
Mínimo	2.39	21
Máximo	3.70	109
Rango	[2.39;3.70]	[21;109]

*Tabla 5.30. Rangos de variaciones de pendientes y elevaciones medias en el área de estudio.*

<i>Pendiente [%]</i>	<i>Rango</i>	<i>Elevación media [m]</i>	<i>Rango</i>
Baja	$0 \leq s \leq 2$	Baja	$h < 50$
Intermedia	$2 < s \leq 3$	Intermedia	$50 \leq h \leq 74$
Alta	$s > 3$	Alta	$h > 74$

*Tabla 5.31. Criterio de clasificación de pendiente y elevación media.*

Como se observa en *Tabla 5.31*, se propone un criterio de clasificación de pendiente y elevación media, el mismo se establece a partir del análisis a escala de HRU del porcentaje de áreas con pendiente entre el mínimo y máximo absoluto, topografía del área y vinculación por características similares.

El lector puede detectar fácilmente que el rango de clasificación de pendiente denominada como *baja*, no se identifica ninguna de las subcuencas (*Tabla 5.30*), esto es así fundamentalmente por dos razones, la primera es que una escala menor, a nivel HRU, se puede observar un rango mayor de variación de los distintos parámetros, entre los cuales se encuentra específicamente la pendiente, por lo cual, la misma a nivel de subcuenca, se trata de una pendiente media de la misma. La segunda razón es demostrar que si bien el área de estudio se encuentra en llanura, dentro de la misma y comparando con cuencas cercanas, se trata de una cuenca con pendiente elevada. A modo de comparación, de acuerdo al estudio del escurrimiento superficial en cuencas de llanura realizado por Riccardi et al. (2018), la cuenca del Arroyo Ludueña presenta una pendiente media del curso principal de 0,1%, la del Arroyo Saladillo es del 0,06%, mientras que para la cuenca del Río Carcarañá se verifica en el curso principal una pendiente media

ponderada de 0,16%, esto puede llevar a inferir en principio que las pendientes de las subcuencas del Río Carcarañá puedan ser relativamente mayores, por ellos se decide considerar intermedias y altas.

A partir de estos rangos propuestos, se establecen las definiciones y límites entre cada parámetro de clasificación del relieve:

- *Loma*: zonas más altas del relieve, donde por lo general no se evidencian problemas de drenaje, debido principalmente a sus pendientes intermedias a altas que evacuan el flujo hacia aguas abajo.
- *Media loma*: zonas intermedias, planas y de gran extensión, las cuales pueden acumular agua en su superficie, aunque por poco tiempo. En general explicado por las menores pendientes respecto a las lomas, lo cual retarda el escurrimiento.
- *Bajo*: zonas más bajas, las cuales se pueden ver anegadas con mayor frecuencia. Son suelos que poseen mayores problemas de drenaje.

<i>Clasificación subcuencas según el relieve</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Elevación media</i>
Bajo	Intermedia	Baja
Media loma	Intermedia	Intermedia
Loma	Intermedia	Alta
Desembocadura	Alta	Baja

*Tabla 5.32. Límites establecidos para cada parámetro.*

Se puede visualizar en *Tabla 5.32.*, cómo se determinan los límite entre *bajo*, *media loma* y *loma*, incluyendo también el parámetro de clasificación tipo *desembocadura*, el cual correspondiente a un situación particular del relieve en la zona de desembocadura al Río Coronda, área donde aunque la elevación media sea baja, las pendiente son relativamente más alta, para salvar la diferencia de altura en un tramo corto, como sucede en las barrancas del Río Paraná y sus tributarios.

En la *Tabla 5.33.* se presenta la clasificación según el relieve de las 27 cuencas y en la *Figura 5.73.*, se presenta el mapa elaborado con la misma.

<i>Subcuenca</i>	<i>Area [Ha]</i>	<i>Pendiente media</i>	<i>Tipo de pendiente</i>	<i>Elevación media [m]</i>	<i>Tipo de elevación</i>	<i>Clasificación de la subcuenca</i>
1	1926.81	3.70%	Alta	21	Baja	Desembocadura
2	8628.30	3.49%	Alta	30	Baja	Desembocadura
3	11363.22	2.67%	Intermedia	38	Baja	Bajo
4	10254.15	2.75%	Intermedia	36	Baja	Bajo
5	7557.03	3.00%	Intermedia	31	Baja	Bajo
6	16528.23	2.76%	Intermedia	65	Intermedia	Media loma
7	19896.57	2.56%	Intermedia	63	Intermedia	Media loma
8	7412.13	3.01%	Intermedia	36	Baja	Bajo
9	7796.07	2.61%	Intermedia	72	Intermedia	Media loma
10	36549.36	2.87%	Intermedia	96	Alta	Loma
11	1082.16	2.44%	Intermedia	55	Intermedia	Media loma
12	19253.16	2.59%	Intermedia	50	Baja	Bajo
13	30975.03	2.74%	Intermedia	68	Intermedia	Media loma
14	7288.02	2.63%	Intermedia	80	Alta	Loma
15	13432.59	2.81%	Intermedia	75	Alta	Loma
16	7958.52	2.73%	Intermedia	80	Alta	Loma
17	7768.53	2.54%	Intermedia	88	Alta	Loma
18	8624.07	2.79%	Intermedia	83	Alta	Loma
19	8812.17	2.92%	Intermedia	100	Alta	Loma
20	2588.04	2.74%	Intermedia	75	Alta	Loma
21	12877.38	2.79%	Intermedia	109	Alta	Loma
22	7084.62	2.69%	Intermedia	77	Alta	Loma
23	5941.89	2.72%	Intermedia	84	Alta	Loma
24	16597.35	2.70%	Intermedia	89	Alta	Loma
25	11484.81	2.76%	Intermedia	86	Alta	Loma
26	15266.97	2.39%	Intermedia	95	Alta	Loma
27	38562.21	2.46%	Intermedia	97	Alta	Loma

Tabla 5.33. Clasificación de subcuencas.

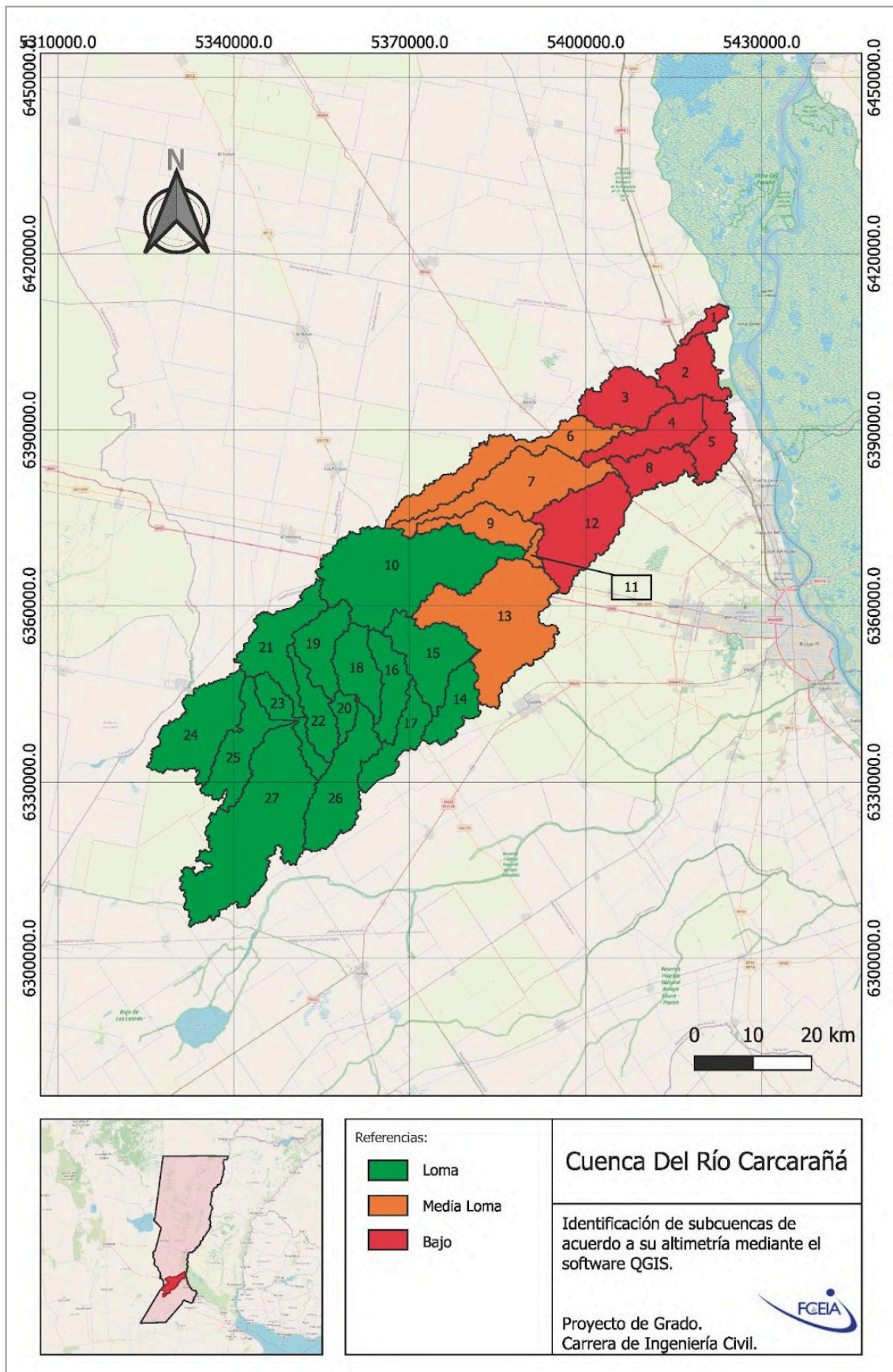


Figura 5.73. Mapa de clasificación de subcuencas.

### 5.2.6. Uso y gestión del suelo (Romagnoli et. al., 2017)

Los datos de entrada de uso de suelo son los utilizados para la conformación del modelo SWAT que abarca el periodo 1998-2015, a continuación se describe la metodología llevada a cabo por la Dra. Ing. Margarita Portapila y el Dr. Ing. Martín Romagnoli para obtener estos datos.

Como se mencionó previamente, la Cuenca Baja del Río Carcarañá se caracteriza por ser una de las regiones de mayor aprovechamiento agrícola - ganadero, encontrándose el 99% de su superficie destinada a la agricultura, siendo los principales cultivos la soja de primera, maíz y trigo. Estos tres cultivos se asignan a un mapa de uso de suelos, y sus áreas de cultivo se estiman mediante el análisis de imágenes de teledetección, la cual es una técnica que permite obtener datos de la superficie terrestre a través de sensores remotos instalados en plataformas espaciales, midiendo la radiación reflejada y emitida a distancia, y procesando estos datos para obtener información interpretable, además de la recolección de datos de campo y la información disponible de productores locales, quienes brindaron información respecto a las prácticas agrícolas para cada cultivo, horarios de operación, cantidad de fertilizante empleada, entre otros..

Como resultado, para la simulación al cultivo de soja le corresponde un área sembrada del 70% del dominio numérico, mientras que al maíz el 15%. Mientras que, el cultivo de trigo presenta un área sembrada del 40% hasta 2007, que a partir del año 2008 se reduce al 20%.

En el momento de la siembra, se aplican fertilizantes minerales a una tasa de 14,14 kg P/ha y 67,8 kg N/ha para maíz, 12,12 kg P/ha y 56,8 kg N/ha para trigo, y 6,6 kg P/ha para soja, obtenidos como promedio de la información brindada por los productores locales.

En cuanto a la cobertura del suelo, en el modelo se consideran rotaciones soja/trigo, maíz/trigo y soja continua.

### 5.3. Calibración y validación de los parámetros (Romagnoli et. al., 2017)

La calibración de los parámetros del modelo SWAT fue llevada a cabo por la Dra. Ing. Margarita Portapila y el Dr. Ing. Martín Romagnoli (Romagnoli et. al., 2017). A continuación, se detalla el procedimiento que se realizó.

Para el periodo 1993-2015, fue llevada a cabo una calibración de los distintos parámetros del modelo, de manera que se ajusten adecuadamente a la realidad y los resultados que deriven de la simulación mantengan una buena precisión. Para esto, se llevaron a cabo dos etapas:

- En primer etapa se realiza un análisis *one-at-a-time (OAT)* para identificar un conjunto de aquellos parámetros que presenten una mayor sensibilidad, para lo cual se modifica el parámetro cuya sensibilidad (sentido físico representativo en el intervalo que se define) se analiza, manteniendo fijos los restantes y se verifica como esta modificación altera a cinco salidas del modelo: el caudal, la recarga del acuífero, concentración de nitrato, concentración de fósforo y rendimiento promedio anual de los cultivos. De esta manera, se determina un conjunto de 25 parámetros más sensibles y el rango en el que esta sensibilidad es notoria, como puede observarse en la *Tabla 5.34*.

Parameter	Sensitivity					Initial range
	FLOW_out	GW_RCHG	YLD	NO3_out	MINP_out	SUFI2
r_CN2.mgt	X	X	X	X	X	-0.21:0.28
v_SURLAG.bsn	X			X	X	0:10
v_ESCO.hru	X	X	X	X	X	0.3:1
r_OV_N.hru				X	X	-0.25:0.25
v_EPCO.hru	X	X	X	X	X	0:0.6
v_N_UPDIS.bsn		X				0:30
v_ERORGN.hru						
v_NPERCO.bsn				X		0:1
v_PSP.bsn						
v_PHOSKD.bsn					X	100:185
v_P_UPDIS.bsn					X	0:60
v_ERORGP.hru					X	0:3
v_PPERCO.bsn						
v_ALPHA_BF.gw				X	X	0.018:0.03
v_GW_DELAY.gw		X				3:7
v_GW_REVAP.gw				X		0.02:0.2
v_GWQMN.gw	X			X	X	0:1000
r_SOL_AWC().sol	X	X	X	X	X	-0.25:0.25
r_SOL_K().sol		X		X	X	-0.5:0.3
v_REVAPMN.gw						
v_HVSTI(56).plant.dat			X			0.3:0.6
v_T_BASE(56).plant.dat	X		X	X	X	8:12
v_EXT_COEF(56).plant.dat			X		X	0.3:0.5
v_BIO_E(56).plant.dat			X		X	20:30
v_T_OPT(56).plant.dat	X		X	X	X	15:30

Tabla 5.34. Análisis OAT de los parámetros de entrada. Romagnoli et al. (2017).

- En segunda etapa se lleva a cabo una rutina de análisis de incertidumbre SUFI2, llevada a cabo en base a los resultados de la primer etapa. En SUFI2, la incertidumbre en los parámetros, expresada como rangos (distribuciones uniformes), tiene en cuenta todas las fuentes de incertidumbres. La propagación de las incertidumbres de los parámetros conduce a incertidumbres en las variables de salida del modelo, que se expresan como distribuciones de probabilidad del 95%. Estas variables se calculan a los niveles de 2,5% y 97,5% de la distribución acumulada de una variable de salida generada por la propagación de las incertidumbres de los parámetros utilizando el muestreo de hipercubos latinos. Este resultado se conoce como incertidumbre de predicción del 95% o 95 PPU. Estos 95 PPU son las salidas del modelo en un enfoque de calibración estocástica. La calidad del ajuste entre el resultado de la simulación (95 PPU) y la observación se caracteriza por dos estadísticos: p-factor y r-factor. El p-factor es el porcentaje de datos observados abarcados por los resultados del modelo, es decir, mide la probabilidad de obtener un factor igual o más extremo que el observado, asumiendo que una hipótesis nula es verdadera, mientras que el r-factor representa la desviación estándar respecto al 95 PPU.

La calibración se llevó a cabo en cinco pasos, donde en cada paso se calibra una variable de salida diferente, mediante tres iteraciones de 500 simulaciones cada una, y a partir del segundo paso se verifican las variables calibradas en pasos anteriores. Como el rendimiento del modelo depende fundamentalmente de la hidrología de la cuenca, las primeras variables de salida calibradas son el caudal y la recarga de agua subterránea. Es importante tener presente que como existen parámetros que alteran el caudal, y otros que alteran la recarga, existen también parámetros que afectan a ambas variables, por lo que es importante realizar una adecuada calibración de cada uno de ellos, ya que al querer calibrar la recarga luego del caudal, es muy probable que se modifique la calibración

realizada previamente, razón por la que se realiza la verificación. Esta secuencia se puede observar en la *Tabla 5.35*.

Step	Objective	Parameters	p-factor	r-factor
1	FLOW_out	8 (8 FLOW_out)	0.78	0.31
2	GW_RCHG	11 (8 FLOW_out* + 3 GW_RCHG)	0.06	0.06
	GW_RCHG	11 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG)	0.30	0.60
	verif. FLOW_out	11 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG*)	0.98	0.49
3	YIELD soyb.	14 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.)	0.55	5.9
	verif. FLOW_out	14 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.*)	0.98	0.48
	verif. GW_RCHG		0.29	0.65
4	YIELD corn	19 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.* + 5 YIELD corn)	0.73	3.32
	verif. FLOW_out	19 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.* + 5 YIELD corn*)	0.98	0.48
	verif. GW_RCHG		0.29	0.67
	verif. YIELD soyb.		0.55	5.50
5	YIELD wheat	24 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.* + 5 YIELD corn* + 5 YIELD wheat)	0.91	2.15
	verif. FLOW_out	24 (4 FLOW_out* + 7 GW_RCHG* + 3 YIELD soyb.* + 5 YIELD corn* + 5 YIELD wheat*)	0.98	0.48
	verif. GW_RCHG		0.29	0.64
	verif. YIELD soyb.		0.55	5.74
	verif. YIELD corn		0.73	3.46

*Tabla 5.35. Proceso de calibración de la Cuenca Baja del Río Carcarañá. Romagnoli et al. (2017).*

Por lo tanto, para calibrar el caudal se utiliza la serie temporal de caudales manuales registrada en la estación de Pueblo Andino para el periodo 1993-2008. El rendimiento de soja, trigo y maíz se calibra en el mismo periodo a partir de la información suministrada por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Para la recarga de los acuíferos se utilizan los resultados reportados por Venecio en 2008, quien cuantificó la recarga estacional de agua subterránea utilizando un modelo de balance hídrico diario para 2000-2003 basado en cuatro estaciones de precipitación y nivel freático, empleándose la de la estación ubicada en La Silesia.

En resumen, se debe entender como idea general que existe un proceso iterativo de calibrar - validar, donde se selecciona los parámetros, se evalúa la sensibilidad de los mismos, se eligen los más sensibles, es decir, aquellos que más hacen variar a la variable a observar, se hace luego un proceso de calibración, para finalmente terminar validando con datos observados en el período 2009-2013.

A continuación se presenta la *Tabla 5.36.*, donde se presentan los rangos de variación de los parámetros calibrados por Romagnoli et al. (2017). Sin modificar estos rangos, realizaron una iteración, con el mismo número de simulaciones usadas durante el proceso de calibración, para realizar la validación.

Los rangos definidos durante este proceso para cada parámetro indican un entorno representativo y con sentido físico de los procesos que se dan en el sistema hidrológico en estudio. Cada simulación utiliza una determinada combinación de valores de los mismos, dentro del rango definido, por lo cual, con todas simulaciones realizadas se puede obtener para cada variable un entorno de variación definido entre un límite inferior y uno superior.

Parameter	Calibrated range
v_SURLAG.bsn	0.09:4.20
v_GWQMN.gw	559.32:853.17
v_T_OPT(56).plant.dat	24.09:30.00
v_T_BASE(56).plant.dat	10.57:12.00
r_SOL_AWC().sol	0.013:0.21
r_CN2.mgt	-0.065:0.23
v_ESCO.hru	0.80:1
v_EPCO.hru	0:0.17
r_SOL_K().sol	-0.06:0.20
v_GW_DELAY.gw	3:4.62
v_N_UPDIS.bsn	16.89:28.75
v_EXT_COEF(56).plant.dat	0.42:0.5
v_BIO_E(56).plant.dat	24.76:28.14
v_HVSTI(56).plant.dat	0.46:0.55
v_T_OPT(19).plant.dat	16.68:28.82
v_T_BASE(19).plant.dat	6.25:7.81
v_EXT_COEF(19).plant.dat	0.61:0.73
v_BIO_E(19).plant.dat	43.31:50
v_HVSTI(19).plant.dat	0.64:0.7
v_T_OPT(28).plant.dat	14.28:22.09
v_T_BASE(28).plant.dat	-0.86:1.39
v_EXT_COEF(28).plant.dat	0.61:0.73
v_BIO_E(28).plant.dat	33.20:40
v_HVSTI(28).plant.dat	0.3:0.40

Tabla 5.36. Rango de parámetros calibrados. Romagnoli et al. (2017).

#### 5.4. Procesos internos

SWAT tiene la capacidad de simular distintos procesos físicos que se presentan en una cuenca hidrográfica. En primer lugar, para cualquier problemáticas que se quiera estudiar con SWAT, se debe saber que es modelo predominantemente hidrológico, por la cual una condición que se debe cumplir siempre es la ecuación de balance hídrico, es decir, el equilibrio hídrico es el eje principal detrás de todo lo que sucede en la cuenca hidrográfica, el mismo se representa en la *Figura 5.74*.

El planteo de la ecuación de balance la hace en función de la variación diaria del contenido de humedad del suelo, la que se puede expresar de la siguiente forma:

$$SW_t = SW_0 + \Sigma(R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

- $SW_t$ : contenido final de agua almacenada en el suelo en  $mmH_2O$ , en un tiempo  $t$ , en días.
- $SW_0$ : contenido inicial de agua almacenada en el suelo en el día  $i$ , en  $mmH_2O$ .
- $R_{day}$ : precipitación en un día  $i$ , en  $mmH_2O$ .
- $Q_{surf}$ : escurrimiento superficial en un día  $i$ , en  $mmH_2O$ .
- $Ea$ : evapotranspiración en un día  $i$ , en  $mmH_2O$ .
- $W_{seep}$ : cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en un día  $i$ , en  $mmH_2O$ .

- $Q_{gw}$ : cantidad de flujo de retorno o subsuperficial en un día  $i$ , en  $mmH_2O$ .

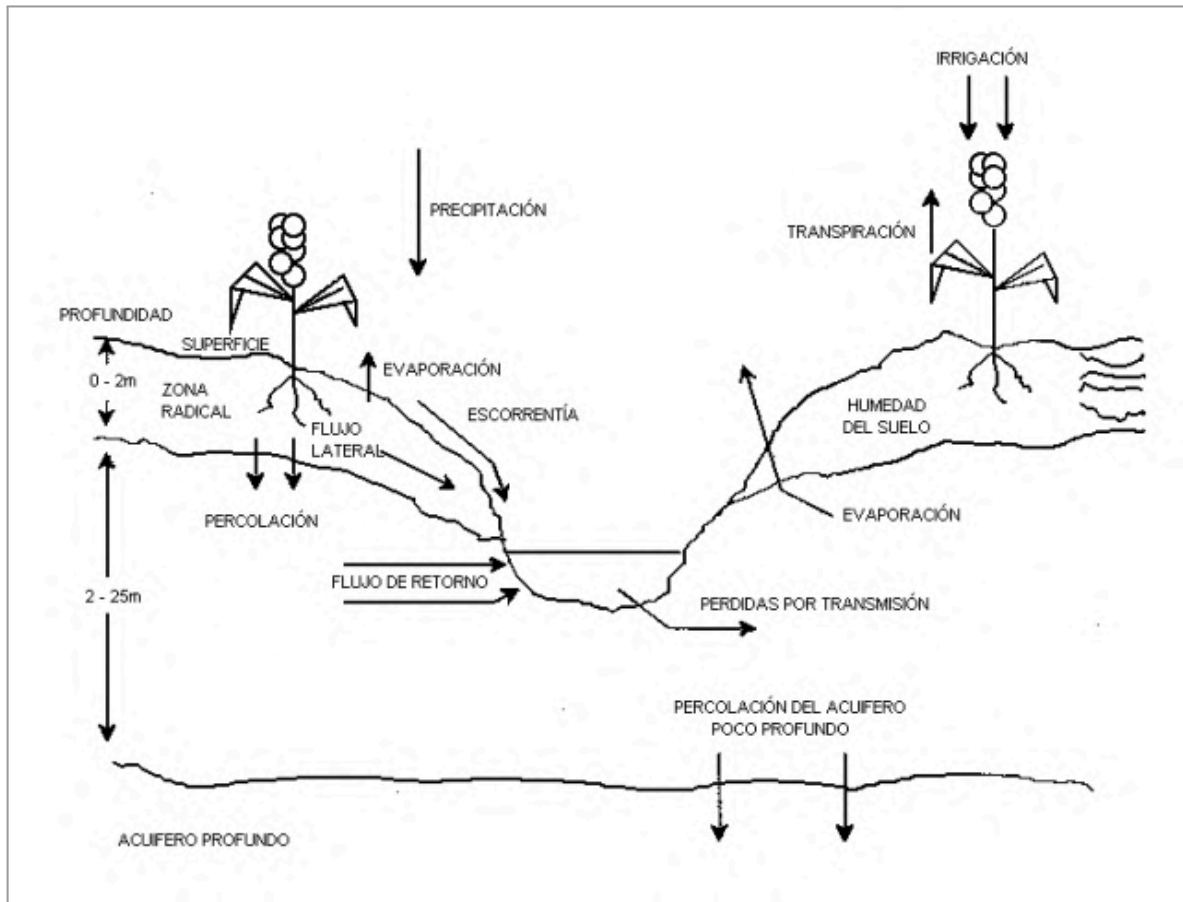


Figura 5.74. Representación del ciclo hidrológico en SWAT. Uribe (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Respecto al clima, como se ha mencionado, proporciona los inputs de humedad y energía que determinan la importancia relativa entre los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Luego, para cada uno de los procesos del ciclo hidrológico existen métodos que SWAT utiliza para evaluarlos, como por ejemplo, el uso del método de infiltración Green & Ampt, el método modificado de número de curva CN del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del USDA (1972) o distintas opciones que permite para estimar la evapotranspiración potencial como los métodos Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), Priestley-Taylor (1972) y Penman-Monteith (1965).

También cuenta con un modelo de crecimiento de plantas que permite simular toda clase de cobertura de suelo, permitiendo distinguir entre plantas perennes y de campaña. Las primeras mantienen su sistema de raíz a lo largo de todo el año, variando su crecimiento de acuerdo a las condiciones externas, mientras que las segundas crecen desde una fecha de plantación hasta la fecha de cosecha. Permite además imponer límites de crecimiento, evaluar la absorción de nutrientes, aplicación de pesticidas, etc.

Con respecto a la erosión y producción de sedimentos utiliza la ecuación modificada de pérdida de suelo MUSLE (William, 1975), que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$sed = 11.8 (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Donde:

- *sed*: producción de sedimentos en el día *i*, en toneladas *t*.
- $Q_{surf}$ : escurrimiento superficial.
- $q_{peak}$ : escurrimiento máximo.
- $area_{hru}$ : área del HRU.
- $K_{USLE}$ : factor de erodabilidad del suelo (tendencia suelo a erosionarse por agua o viento).
- $C_{USLE}$ : factor de cobertura y gestión de USLE.
- $P_{USLE}$ : factor de prácticas de conservación de USLE.
- $LS_{USLE}$ : factor topográfico.
- *CFRG*: factor fragmento macro.

Por otro lado, otra de las funciones con las que cuenta SWAT es que permite calcular las características geomorfológicas de las subcuencas, es decir, pendiente del cauce principal, pendiente media, elevación media, elevación máxima y mínima, etc.

## 5.5.Outputs

SWAT genera diferentes archivos de textos de salida del modelo simulado, que luego pueden ser procesados y analizados. Se conforman de diferentes archivos output, algunas de los cuales son:

- *output.std*: contiene un resumen de los resultados de la simulación agrohidrológica.
- *output.sub*: presenta información a escala de subcuenca de las distintas variables del ciclo hidrológico, nutrientes, sedimentos, etc.
- *output.rch*: cuenta con los datos del cauce principal de cada subcuenca, entre los cuales se muestran el caudal de entrada, caudal de salida en la sección de cierre (con el cual se puede generar el hidrograma de salida), transporte de sedimentos y nutrientes, etc.,
- *output.mgt*: información a escala de HRU de uso y gestión del suelo asociados a los mismos, como la aplicación de pesticidas, producción de biomasa y residuo, producción, tipo de cultivo, etc.
- *output.hru*: incluye información a escala de HRU de variables como precipitación, escurrimiento superficial, evapotranspiración, percolación, etc.

## 6.Resultados

El modelo SWAT brinda una serie de variables de salida a través de varios archivos output que resultan de interés analizar, siendo los más importantes el .sub, que brinda la salida de la simulación para cada cuenca y nos permite evaluar distintas variables de salida de la ecuación de balance, el .rch, que establece la salida para el curso de agua más importante de cada subcuenca, y el .mgt, donde se presentan determinadas variables de salida a escala de HRU, pudiendo solicitarse que estos archivos sean provistos diariamente o mensualmente. El archivo de salida .sub presenta la siguiente estructura, cuando se solicita que los resultados se expresen en formato mensual:

	SUB	GIS	MON	AREAKm2	PRECIPmm	SNOMELTmm	PETmm	ETmm	SWmm	PERCmm	SURQmm
BIGSUB	1	0	1.19268E+02	249.850	0.000	223.980	148.370	376.431	0.705	65.959	
BIGSUB	2	0	1.86283E+02	249.850	0.000	223.954	148.503	377.400	0.448	65.300	
BIGSUB	3	0	1.11363E+03	249.850	0.000	223.933	149.157	374.547	1.845	65.078	
BIGSUB	4	0	1.10254E+03	249.850	0.000	223.938	149.668	361.240	1.755	63.332	
BIGSUB	5	0	1.75570E+02	249.850	0.000	223.952	147.321	385.096	0.398	71.720	
BIGSUB	6	0	1.16528E+03	216.736	0.000	227.406	150.249	307.324	4.166	45.284	
BIGSUB	7	0	1.19897E+03	216.421	0.000	227.083	154.267	294.126	3.577	36.326	
BIGSUB	8	0	1.74121E+02	249.851	0.000	223.937	149.562	332.147	2.411	67.207	
BIGSUB	9	0	1.77961E+02	211.807	0.000	222.214	151.717	274.127	4.993	35.527	
BIGSUB	10	0	1.36549E+03	236.072	0.000	208.609	151.368	251.305	17.675	79.739	
BIGSUB	11	0	1.10822E+02	269.757	0.000	238.518	175.697	266.011	21.173	72.027	
BIGSUB	12	0	1.19253E+03	212.682	0.000	190.592	133.078	275.461	3.749	51.778	
BIGSUB	13	0	1.30975E+03	266.035	0.000	235.184	171.236	293.105	16.239	77.063	

Figura 6.1. Fracción del archivo output.sub.

Donde, se puede ver que se expresan para cada subcuenca los resultados de cada variable de salida para el mes 1 del año 1998, luego para el mes 2, y así sucesivamente, hasta alcanzar el mes 12. Luego, antes de cambiar de año, se expresan los valores anuales del respectivo año para cada subcuenca, para que después de estos renglones se repita nuevamente la estructura para el año siguiente. (Figura 6.2.)

BIGSUB	27	0	12.38562E+03	135.291	0.000	293.960	166.504	174.706		
BIGSUB	1	0	1998.19268E+02	831.433	0.000	1709.093	758.110	301.553		
BIGSUB	2	0	1998.86283E+02	831.433	0.000	1708.872	758.463	302.696		
BIGSUB	3	0	1998.11363E+03	831.433	0.000	1708.697	760.950	301.766		
BIGSUB	4	0	1998.10254E+03	831.434	0.000	1708.738	763.235	286.391		
BIGSUB	5	0	1998.75570E+02	831.433	0.000	1708.859	753.207	310.818		
BIGSUB	6	0	1998.16528E+03	1007.127	0.000	1730.204	838.992	267.482		
BIGSUB	7	0	1998.19897E+03	1005.664	0.000	1727.749	866.432	254.914		
BIGSUB	8	0	1998.74121E+02	831.434	0.000	1708.733	764.235	255.845		
BIGSUB	9	0	1998.77961E+02	984.224	0.000	1690.696	854.054	234.907		
BIGSUB	10	0	1998.36549E+03	961.059	0.000	1532.418	711.179	194.185		
BIGSUB	11	0	1998.10822E+02	1098.189	0.000	1752.181	824.513	210.207		
BIGSUB	12	0	1998.19253E+03	707.747	0.000	1454.276	681.659	193.050		
BIGSUB	13	0	1998.30975E+03	1083.037	0.000	1727.674	806.232	236.063		
BIGSUB	14	0	1998.72880E+02	1107.210	0.000	1765.906	829.198	270.050		
BIGSUB	15	0	1998.13433E+03	1019.188	0.000	1625.639	761.790	202.919		
BIGSUB	16	0	1998.79585E+02	1061.878	0.000	1711.772	796.490	224.199		
BIGSUB	17	0	1998.77685E+02	1125.128	0.000	1819.858	850.221	256.560		
BIGSUB	18	0	1998.86241E+02	1111.870	0.000	1792.276	817.304	181.607		
BIGSUB	19	0	1998.88122E+02	1125.127	0.000	1813.130	816.930	163.113		
BIGSUB	20	0	1998.25880E+02	1125.126	0.000	1813.879	856.796	173.288		
BIGSUB	21	0	1998.12877E+03	1124.491	0.000	1811.822	828.091	175.685		
BIGSUB	22	0	1998.70846E+02	1114.965	0.000	1797.440	837.487	167.156		
BIGSUB	23	0	1998.59419E+02	1075.314	0.000	1733.310	806.307	170.773		
BIGSUB	24	0	1998.16597E+03	1070.156	0.000	1768.443	812.643	164.434		
BIGSUB	25	0	1998.11485E+03	1074.879	0.000	1738.645	806.042	181.177		
BIGSUB	26	0	1998.15267E+03	1125.126	0.000	1819.647	866.680	177.282		
BIGSUB	27	0	1998.38562E+03	1118.138	0.000	1808.286	857.611	174.706		
BIGSUB	1	0	1.19268E+02	85.486	0.000	275.222	121.788	262.647		

Figura 6.2. Fracción del archivo output.sub con valores anuales.

Una vez que se expresan todos los resultados mensuales y anuales de cada subcuenca, los últimos renglones del archivo se reservan para un valor medio anual para cada subcuenca, es decir, el valor medio de todos los años del periodo analizado, resultando para este periodo en 18 años. (Figura 6.3.)

BIGSUB	24	0 2015.16597E+03	1190.120	0.000	2321.330
BIGSUB	25	0 2015.11485E+03	1222.149	0.000	2264.627
BIGSUB	26	0 2015.15267E+03	1279.281	0.000	2369.949
BIGSUB	27	0 2015.38562E+03	1271.334	0.000	2355.112
BIGSUB	1	0 18.0.19268E+02	1041.783	0.000	1905.909
BIGSUB	2	0 18.0.86283E+02	1041.783	0.000	1905.606
BIGSUB	3	0 18.0.11363E+03	1041.783	0.000	1905.367
BIGSUB	4	0 18.0.10254E+03	1041.783	0.000	1905.423
BIGSUB	5	0 18.0.75570E+02	1041.782	0.000	1905.590
BIGSUB	6	0 18.0.16528E+03	1071.971	0.000	1925.759
BIGSUB	7	0 18.0.19897E+03	1070.414	0.000	1923.040
BIGSUB	8	0 18.0.74121E+02	1041.784	0.000	1905.415
BIGSUB	9	0 18.0.77961E+02	1047.594	0.000	1881.750
BIGSUB	10	0 18.0.36549E+03	936.407	0.000	1694.502
BIGSUB	11	0 18.0.10822E+02	1070.019	0.000	1937.704
BIGSUB	12	0 18.0.19253E+03	886.805	0.000	1621.603
BIGSUB	13	0 18.0.30975E+03	1055.256	0.000	1910.545
BIGSUB	14	0 18.0.72880E+02	1078.809	0.000	1952.765
BIGSUB	15	0 18.0.13433E+03	993.045	0.000	1797.677
BIGSUB	16	0 18.0.79585E+02	1002.412	0.000	1886.750
BIGSUB	17	0 18.0.77685E+02	1062.120	0.000	2000.365
BIGSUB	18	0 18.0.86241E+02	1049.605	0.000	1975.471
BIGSUB	19	0 18.0.88122E+02	1062.119	0.000	1998.385
BIGSUB	20	0 18.0.25880E+02	1062.119	0.000	1999.316
BIGSUB	21	0 18.0.12877E+03	1061.519	0.000	1996.903
BIGSUB	22	0 18.0.70846E+02	1052.526	0.000	1981.188
BIGSUB	23	0 18.0.59419E+02	1015.096	0.000	1910.472
BIGSUB	24	0 18.0.16597E+03	917.080	0.000	1945.786
BIGSUB	25	0 18.0.11485E+03	1014.685	0.000	1911.103
BIGSUB	26	0 18.0.15267E+03	1062.119	0.000	2000.112
BIGSUB	27	0 18.0.38562E+03	1055.522	0.000	1987.617

Figura 6.3. Fracción del archivo output.sub con valores medios anuales.

El archivo provee las siguientes columnas:

- **SUB:** Identifica el número de subcuenca del modelo. La identificación que le corresponde a cada una se puede observar en la Figura 5.72.
- **MON:** Identifica el mes al que le corresponden los valores de dicho renglón. En el caso de los valores anuales, se expresa el año (Figura 6.2.), mientras que para el valor medio de todo el periodo, se identifica la cantidad de años que abarca la simulación (Figura 6.3.). Estos números se presentan previamente de un punto.
- **AREAKm2:** Expresa el área de la subcuenca correspondiente a dicho renglón en  $km^2$ .
- **PRECIPmm:** Precipitación total sobre la subcuenca para el correspondiente periodo en milímetros.
- **SNOMELTmm:** Cantidad total de nieve o hielo que cae sobre la subcuenca en dicho periodo, en términos de cantidad de milímetros de agua equivalente.

- **PETmm:** Evapotranspiración potencial de la subcuenca proyectada para el periodo correspondiente, en milímetros.
- **ETmm:** Evapotranspiración efectiva de la subcuenca para dicho periodo, expresada en milímetros.
- **SWmm:** Cantidad de agua almacenada en el suelo al final del periodo, en milímetros.
- **PERCmm:** Percolación de agua a través del suelo para dicho periodo de tiempo, en milímetros.
- **SURQmm:** Contribución al escurrimiento superficial en el periodo analizado, expresado en mm. Se traduce en la precipitación neta, a partir de la cual es posible conocer el caudal.
- **GW\_Qmm:** Contribución del agua subterránea al escurrimiento superficial para este periodo, expresada en milímetros. Es decir, es el agua del acuífero poco profundo que regresa a la superficie durante el periodo de tiempo.
- **WYLDMmm:** Rendimiento de agua expresada en milímetros. Se trata de la cantidad neta de agua que sale de la subcuenca y contribuye al caudal en el periodo correspondiente. Valor muy similar al SURQ, pero tiene presente la contribución del flujo mantiforme.
- **SYLDT/ha:** Producción de sedimentos en toneladas por hectárea en la subcuenca para el periodo de análisis.
- **ORGNkg/ha:** Producción de nitrógeno en kilogramos por hectárea. Nitrógeno orgánico transportado fuera de la subcuenca durante el periodo de tiempo.
- **ORGPkg/ha:** Producción de fósforo en kilogramos por hectárea. Fósforo orgánico transportado fuera de la subcuenca durante el periodo de tiempo.
- **NSURQkg/ha:**  $NO_3$  presente en el escurrimiento superficial, expresado en kilogramos por hectárea. Se trata del nitrato transportado por el escurrimiento superficial para dicho periodo.
- **SOLPkg/ha:** Producción de fósforo soluble, en kilogramos por hectárea. Fósforo que se transporta por escurrimiento superficial en el periodo.
- **SEDPkg/ha:** Producción de fósforo mineral, en kilogramos por hectárea. Fósforo mineral, unido a sedimento, que es transportado por el escurrimiento superficial en el periodo de tiempo.
- **LAT Q(mm):** Flujo subsuperficial promedio de la subcuenca en el periodo, en milímetros.
- **LATNO3kg/ha:** Contenido de nitrato en el flujo subsuperficial, en kilogramos por hectárea.
- **GWNO3kg/ha:** Contenido de nitrato en el flujo subterráneo que aporta al escurrimiento superficial.

En cuanto al archivo output.mgt, el mismo presenta una estructura particular, donde se ordenan los resultados por cada mes del año para todos los HRU sembrados de una subcuenca, pasando de subcuenca a subcuenca, donde van variando tanto la operación que se realiza en los distintos HRU, en función de lo que se establece en el input para el correspondiente mes, como el cultivo sembrado, cosechado o fertilizado. De esta manera, se realiza un enfoque en el mes 11 de cada subcuenca, donde en los distintos años se realiza la operación *HARV/KILL* del cultivo *WWHT*, es decir la cosecha del trigo de invierno. En la *Figura 6.4.* se

presenta una fracción del archivo, observándose, en este caso, HRUS donde se aplica pesticida y su correspondiente valor en la columna, mientras que en la *Figura 6.5.* se observan una serie de filas de interés, con la operación buscada para el cultivo de trigo y su valor en la columna *Yield*.

Sub	Hru	Year	Mon	Day	AREAKm2	crop/fert/pest	Operation	phubase	phuacc	sol_sw	bio_ms	sol_rsd	sol	yield
									mm	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	mm
00001	0001	1993	1	10	.90175E-03	Lorsb	PEST	0.04	0.00	207.98	0.00	0.00	94.03	517.23
00001	0002	1993	1	10	.54047E-02	Lorsb	PEST	0.04	0.00	207.97	0.00	0.00	94.03	517.23
00001	0003	1993	1	10	.10811E-01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	207.96	0.00	0.00	94.03	517.23
00001	0004	1993	1	10	.61261E-01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	207.89	0.00	0.00	94.03	517.23
00001	0005	1993	1	10	.55045E+00	Lorsb	PEST	0.04	0.00	173.48	0.00	0.00	91.75	412.80
00001	0006	1993	1	10	.11081E+00	Lorsb	PEST	0.04	0.00	173.52	0.00	0.00	91.76	412.80
00001	0007	1993	1	10	.16063E+01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	173.43	0.00	0.00	91.75	412.80
00001	0008	1993	1	10	.16036E+01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	173.34	0.00	0.00	91.75	412.80
00001	0009	1993	1	10	.39333E+01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	172.94	0.00	0.00	91.74	412.80
00001	0010	1993	1	10	.65766E-01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	166.84	0.00	0.00	92.69	413.60
00001	0011	1993	1	10	.11711E-01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	166.84	0.00	0.00	92.69	413.60
00001	0012	1993	1	10	.18198E+00	Lorsb	PEST	0.04	0.00	166.83	0.00	0.00	92.69	413.60
00001	0013	1993	1	10	.14324E+00	Lorsb	PEST	0.04	0.00	166.82	0.00	0.00	92.69	413.60
00001	0014	1993	1	10	.26216E+00	Lorsb	PEST	0.04	0.00	166.81	0.00	0.00	92.68	413.60
00001	0015	1993	1	10	.27033E-02	Lorsb	PEST	0.04	0.00	143.42	0.00	0.00	91.31	345.24
00001	0082	1993	1	10	.45045E-01	Lorsb	PEST	0.04	0.00	173.48	0.00	0.00	91.75	412.80

Figura 6.4. Fracción del archivo output.mgt.

00016	0175	1998	11	334	.80182E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	333.66	2942.82	1578.64	24.44	363.18	721.51
00016	0176	1998	11	334	.14413E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	333.74	2943.58	1578.99	24.41	363.53	721.69
00016	0177	1998	11	334	.22793E+00	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	333.56	2941.82	1578.18	24.47	362.78	721.26
00016	0178	1998	11	334	.21261E+00	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	333.36	2940.00	1577.33	24.29	362.48	720.82
00016	0179	1998	11	334	.36487E+00	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	333.04	2937.11	1575.98	24.41	361.78	720.11
00016	0180	1998	11	334	.27059E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	247.76	3709.25	1956.49	7.96	267.78	909.42
00016	0181	1998	11	334	.89931E-03	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	247.76	3710.04	1956.87	7.96	268.08	909.61
00016	0182	1998	11	334	.81097E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	247.76	3707.85	1955.81	7.97	267.34	909.07
00016	0183	1998	11	334	.15312E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	247.76	3705.47	1954.66	7.99	266.94	908.49
00016	0184	1998	11	334	.36036E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	247.75	3702.46	1953.21	8.01	266.32	907.75
00016	0185	1998	11	334	.27059E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	194.17	4229.16	2219.70	8.58	216.78	1036.89
00016	0186	1998	11	334	.17986E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	194.17	4229.42	2219.83	8.59	217.03	1036.95
00016	0187	1998	11	334	.89931E-03	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	194.16	4228.84	2219.53	8.58	216.55	1036.81
00016	0188	1998	11	334	.41440E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	194.16	4228.02	2219.13	8.56	216.07	1036.61
00016	0189	1998	11	334	.59458E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	194.15	4226.96	2218.62	8.54	215.54	1036.35
00016	0190	1998	11	334	.63031E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	308.22	4055.71	2117.16	9.92	330.16	994.36
00016	0191	1998	11	334	.17986E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	308.39	4057.56	2118.08	9.90	330.55	994.82
00016	0192	1998	11	334	.12614E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	308.05	4053.84	2116.23	9.94	329.83	993.90
00016	0193	1998	11	334	.81097E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	307.57	4048.91	2113.86	10.00	329.46	992.69
00016	0194	1998	11	334	.17119E-01	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	307.04	4043.63	2111.41	10.06	328.85	991.40
00016	0195	1998	11	334	.90090E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	258.52	3585.17	1886.22	7.08	277.08	879.00
00016	0196	1998	11	334	.27059E-02	WWHT	HARV/KILL	0.57	1.23	258.54	3585.54	1886.34	7.11	277.44	879.09

Figura 6.5. Fracción del archivo output.mgt con rendimientos de trigo.

Finalmente, del archivo output.rch, interesan las primeras columnas, donde se encuentra el caudal que ingresa y sale del curso principal que atraviesa cada subcuenca para los distintos meses, presentando una estructura similar al archivo output.sub, donde al finalizar un año el archivo presenta los valores anuales, y al final de la simulación el valor medio anual. En la *Figura 6.6.* se observa una fracción del archivo, observándose las columnas FLOW\_IN, que representa el caudal de ingreso, y FLOW\_OUT, representando el caudal de salida, ambos en  $m^3/s$ . En este archivo, la denominación de las subcuencas se encuentra en la columna *RCH*, que representa al curso principal.

	RCH	GIS	MON	AREAKm2	FLOW_INcms	FLOW_OUTcms
REACH	1	0	1	0.3435E+04	0.2386E+03	0.2385E+03
REACH	2	0	1	0.3416E+04	0.2384E+03	0.2381E+03
REACH	3	0	1	0.1136E+03	0.2771E+01	0.2776E+01
REACH	4	0	1	0.3815E+03	0.8005E+01	0.8048E+01
REACH	5	0	1	0.2948E+04	0.2286E+03	0.2282E+03
REACH	6	0	1	0.1653E+03	0.2798E+01	0.2794E+01
REACH	7	0	1	0.1990E+03	0.2702E+01	0.2697E+01
REACH	8	0	1	0.2873E+04	0.2270E+03	0.2266E+03
REACH	9	0	1	0.7796E+02	0.1048E+01	0.1047E+01
REACH	10	0	1	0.3655E+03	0.1142E+02	0.1149E+02
REACH	11	0	1	0.4543E+03	0.1284E+02	0.1285E+02
REACH	12	0	1	0.2599E+04	0.2229E+03	0.2224E+03
REACH	13	0	1	0.1953E+04	0.2072E+03	0.2063E+03
REACH	14	0	1	0.7288E+02	0.2120E+01	0.2121E+01
REACH	15	0	1	0.1570E+04	0.1963E+03	0.1959E+03
REACH	16	0	1	0.1358E+04	0.1910E+03	0.1909E+03
REACH	17	0	1	0.7769E+02	0.1562E+01	0.1559E+01
REACH	18	0	1	0.1278E+04	0.1897E+03	0.1896E+03
REACH	19	0	1	0.8812E+02	0.2037E+01	0.2028E+01
REACH	20	0	1	0.1039E+04	0.1855E+03	0.1853E+03
REACH	21	0	1	0.1288E+03	0.2768E+01	0.2735E+01
REACH	22	0	1	0.9255E+03	0.1832E+03	0.1830E+03
REACH	23	0	1	0.7259E+03	0.1792E+03	0.1791E+03
REACH	24	0	1	0.1660E+03	0.1697E+03	0.1693E+03
REACH	25	0	1	0.2808E+03	0.1717E+03	0.1713E+03
REACH	26	0	1	0.1527E+03	0.2639E+01	0.2591E+01
REACH	27	0	1	0.3856E+03	0.6886E+01	0.6705E+01
REACH	1	0	2	0.3435E+04	0.2363E+03	0.2363E+03

Figura 6.6. Fracción del archivo output.rch.

Luego de la introducción realizada explicando la estructura de los archivos de salida *output* que se obtienen de la simulación, es importante tener en cuenta que para poder validar los datos de salida entregados por el modelo SWAT, se debe establecer una comparación con datos de campo observados, esto permite evaluar la capacidad de simulación del mismo.

Es por ello, que con esta motivación, en este proyecto se elabora una tabla resumen (*Tabla 6.1.*) cuyo objetivo vincular las problemáticas agroecológicas e hídricas relevadas y descritas en el *Ítem 4*, con las variables de SWAT a observar inicialmente, y demostrar la capacidad de análisis que tiene el modelo.

<i>Capacidad de análisis del modelo</i>			
<b>Problemática</b>	<b>Escala del análisis</b>	<b>Variables SWAT a analizar</b>	<b>Paso del modelo SWAT</b>
Inundación	Subcuenca	SURQ (Cont. Sup.), ET (Evapotranspiración), PERC (Percolación), SW (Humedad del suelo), PRECIP (Precipitación), FLOW_OUT (Caudal sección de cierre), SYLD (Produc. de sedimentos)	Diario/Mensual
Sequía	Subcuenca	SURQ (Cont. Sup.), ET (Evapotranspiración), PERC (Percolación), SW (Humedad del suelo), PRECIP (Precipitación), FLOW_OUT (Caudal sección de cierre), SYLD (Produc. de sedimentos)	Diario/Mensual
Agotamiento de los nutrientes del suelo	Subcuenca, HRU	ORGN (Nitrógeno orgánico), ORGP (Fósforo orgánico)	Mensual/Anual
Reducción de productividad del suelo	Subcuenca, HRU	Rendimiento soja, Rendimiento trigo	Mensual/Anual
Erosión	Subcuenca	SYLD (Produc. de sedimentos)	Mensual/Anual
Impermeabilización del suelo	Subcuenca	PERC (Percolación), SURQ (Cont. Sup.), SW (Humedad del suelo)	Mensual/Anual
Efecto de utilizar o no cultivos de cobertura	Subcuenca, HRU	PERC (Percolación), ET (Evapotranspiración), SURQ (Cont. Sup.), SYLD (Produc. de sedimentos)	Mensual
Contaminación puntual por actividades industriales	Subcuenca, Generación de mapa de industrias, Datos de efluentes	SEDP (Fósforo mineral), SOLP (Fósforo soluble), NSURQ (Nitrato en escurrimiento)	Mensual/Anual
Canalizaciones informales	Subcuenca, Reformulación red de drenaje	SURQ (Cont. Sup.), FLOW_OUT (Caudal sección de cierre)	Diario/Mensual

Tabla 6.1. Tabla resumen de capacidad de análisis del modelo.

La tabla muestra un resumen con las principales problemáticas identificadas dentro de la cuenca de análisis entre los años 1998-2024 e ilustra posibles escalas de análisis y las variables de entrada/salida a observar que pueden vincular la variable simulada con datos de campo observados. Las celdas color verde son las elegidas para evaluar la capacidad de simulación del modelo en el presente trabajo. Las celdas color naranja son problemáticas cuya validación no puede ser evaluada mediante la modelación actual y requiere generación de información de entrada del modelo adicional, las cuales pueden ser motivación para futuros proyectos de investigación sobre el área en estudio.

Respecto a la contaminación puntual por actividades industriales se puede generar, a modo de inventario, un mapa georreferenciado de las industrias que desarrollen sus actividades dentro de la cuenca, incluyendo el tipo de industria, estimación del volumen de efluentes volcados de acuerdo a su actividad, ubicación del punto de vuelco, etc. Y también obtener datos de los efluentes, preferentemente mediante obtención de muestras en campo durante un determinado período, para poder caracterizarlos en laboratorio, determinando su composición química, pH, sólidos en suspensión, etc, mediante monitoreo propio y con la posibilidad de complementar con datos de organismos regulatorios y organizaciones no gubernamentales. Con estos datos se puede generar un input, que permita ingresar por ejemplos puntos de entradas de contaminantes al modelo.

Y respecto a las canalizaciones informales, una de las opciones a explorar es la reformulación de la red de drenaje, sabiendo que este tipo de canalizaciones generan un aumento de la velocidad del flujo disminuyendo el tiempo de concentración, aumentando los caudales pico, generando un mayor riesgo de inundaciones aguas abajo, mayor erosión y producción de sedimentos, etc. La propuesta es empezar por generar un mapa de canalizaciones informales existentes mediante salidas de campo, evaluación de imágenes satelitales, etc, y estudiar cómo las mismas alteran el escurrimiento natural. Y luego evaluar cómo se puede tener en cuenta esta problemática en el modelo, por ejemplo explorando la posibilidad de modificación de la red de drenaje, modificar el MDE, etc.

De forma complementaria se elabora las *Tablas 6.2, 6.3 y 6.4*, en las cuales se identifica la problemática en estudio, lugar y fecha del dato de campo secundario relevado, identificación de la subcuenca con su clasificación y un resumen del rango temporal relevado y subcuencas involucradas.

Problema	Lugar	Fecha	Subcuenca a analizar	Clasificación
Contaminación puntual por actividades industriales	Arteaga	2019-2021	24	Loma
	Oliveros	09/12/2018	2	Bajo

Rango temporal	[2018:2021]	Subcuencas relevadas	2, 24
Mín.	09/12/2018		
Máx.	2019-2021		

Tabla 6.2. Tabla resumen de relevamiento de contaminación puntual por actividades industriales.

Problema	Lugar	Fecha	Subcuenca a analizar	Clasificación
Inundación	Aldao	15/03/2015	5	Bajo
	Arequito	14/05/2015	17	Loma
		17/08/2015		
		24/03/2015		
	Armstrong	24/03/2015	10	Loma
		06/01/2016		
		16/01/2017		
		18/08/2019		
	Arteaga	12/03/2015	24	Loma
		24/03/2015		
	Berabevú	21/02/2016	27	Loma
	Bustinza	27/02/2016	7	Media Loma
	Cafferata	26/02/2020	27	Loma
	Cañada de Gómez	24/11/2000	10	Loma
24/03/2015				
Cañada del Ucle	17/07/2019	27	Loma	
Carcarañá	05/03/2014	13	Media Loma	
	12/03/2015			

Inundación	Casilda	17/08/2015	13	Media Loma
		14/05/2015		
	Chañar Ladeado	21/02/2016	27	Loma
	Godekén	21/02/2016	27	Loma
	La Chispa	17/03/2014	27	Loma
		24/07/2014		
	Los Molinos	24/03/2015	14	Media Loma
		17/08/2015		
		14/05/2015		
		30/03/2017		
	Oliveros	21/08/2015	2	Bajo
	Pueblo Andino	15/03/2015	8	Bajo
		20/08/2015		
		03/02/2019		
San Jerónimo Sud	13/03/2021	12	Bajo	
San José de la Esquina	24/03/2015	25	Loma	
	17/08/2015			
Timbúes	11/03/2015	5	Bajo	
	30/10/2012			
	19/02/2016			
Villa Eloísa	24/03/2015	19	Loma	

Tabla 6.3. Tabla resumen de relevamiento de inundaciones.

Problema	Lugar	Fecha	Subcuenca a analizar	Clasificación
Sequía	Aldao	24/07/2018	5	Bajo
		06/04/2023		
	Arequito	24/07/2018	17	Loma
	Armstrong	24/07/2018	10	Loma
25/06/2020				

Sequía	Arteaga	24/07/2018	24	Loma
	Berabevú	17/10/2022	27	Loma
	Cañada de Gómez	20/11/2022	10	Loma
		30/03/2023		
	Cañada del Ucle	20/10/2023	27	Loma
	Carcarañá	24/07/2018	13	Media Loma
		27/07/2023		
	Casilda	24/07/2018	13	Media Loma
	Correa	24/07/2018	10	Loma
	Los Molinos	24/07/2018	14	Media Loma
	Lucio V. Lopéz	24/07/2018	12	Bajo
	Oliveros	24/07/2018	2	Bajo
	Pueblo Andino	24/07/2018	8	Bajo
	Puerto Gaboto	24/07/2018	1	Bajo
	San Jerónimo Sud	24/07/2018	12	Bajo
	San José de la Esquina	24/07/2018	25	Loma
Serodino	24/07/2018	3	Bajo	
Timbúes	24/07/2018	5	Bajo	
Villa Eloísa	24/07/2018	19	Loma	

Tabla 6.4. Tabla resumen de relevamiento de sequía.

Concluyendo, a partir de toda la información relevada, procesada y analizada, se genera el siguiente mapa de problemáticas, *Figura 6.7.*, con la idea de que se pueda seguir completando en los siguientes años y que el mismo pueda ser utilizado para comprender las distintas problemáticas que afectan a la cuenca en estudio, no únicamente las inundaciones, y poder generar espacios de trabajo que involucren a los distintos actores con el objetivo de mitigar o disminuir el impacto de las mismas.

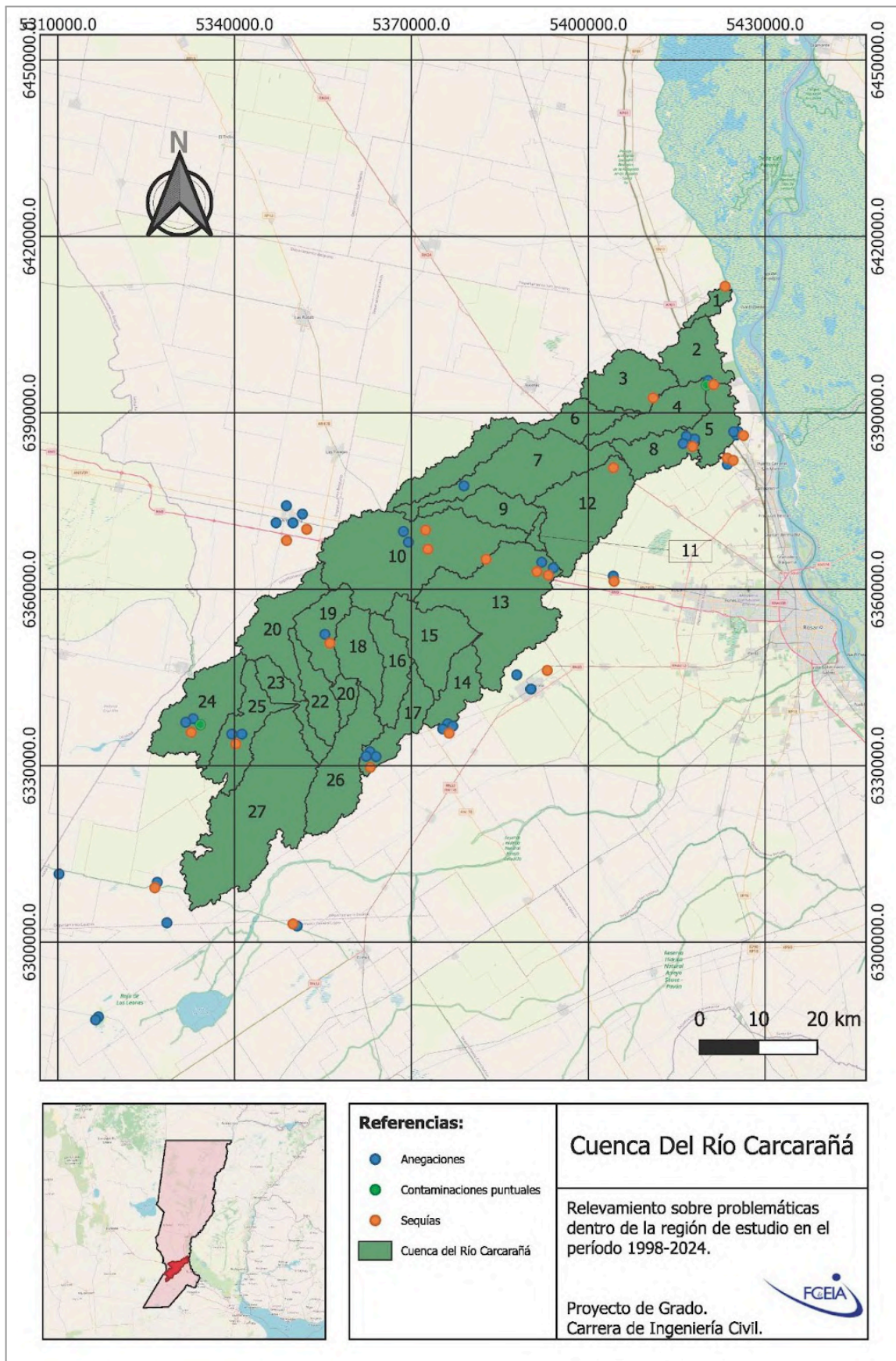


Figura 6.7. Mapa de problemáticas.

### 6.1. Simulación de SWAT en período 1998-2015

La simulación realizada en el período 1998-2015 se realiza con los datos obtenidos por la Dra. Ing. Margarita Portapila y el Dr. Ing. Martín Romagnoli, en términos del trabajo desarrollado por los mismos (Romagnoli et. al., 2017). De este periodo resulta interesante analizar tres problemáticas, la erosión, las inundaciones dentro de la cuenca y el rendimiento de trigo en períodos de importante precipitación, por lo que, como se establece en las *Tablas 6.2., 6.3. y 6.4.*, el análisis se centrará en las siguientes variables de salida, evaluadas mensualmente:

- *Producción de sedimentos (SYLD)*
- *Escorrentamiento superficial (SURQ)*
- *Percolación (PERC)*
- *Evapotranspiración (ET)*
- *Almacenamiento en el suelo (SW)*
- *Escorrentamiento del cauce principal en la sección de cierre de la subcuenca (FLOW\_OUT)*
- *Rendimiento de trigo (YIELD, en operación HARV/KILL con cultivo WWHT)*

#### 6.1.1. Erosión

La erosión de una subcuenca es un valor que se encuentra estrechamente ligado con distintas características de la misma, como es el tipo de suelo y la pendiente de la subcuenca, estando a su vez, influenciado por la precipitación dentro de la misma. Este fenómeno no solo resulta perjudicial para los productores, ya que se relaciona con la disminución de la productividad del suelo, debido principalmente a la pérdida de materia orgánica en los estratos superiores, si no que produce el transporte y depósito de sedimentos en zonas más alejadas. Para el análisis de esta problemática se estudia la variable de salida *SYLD*, decidiéndose observar cómo varía la producción de sedimentos en tres subcuencas con pendiente alta, escogiendo las subcuencas 1, 2 y 19, y en otras tres con pendiente baja, eligiendo las subcuencas 11, 26 y 27, de acuerdo a la *Tabla 5.33*. Es destacable, que aquellas cuencas ubicadas en las cercanías de la desembocadura en el Coronda, presentan pendientes elevadas (Sub. 1 y 2), mientras que las ubicadas en las cercanías del límite con Córdoba presentan menores pendientes (Sub. 26 y 27).

A continuación (*Figuras 6.8. a 6.13.*) se observa la producción anual de sedimentos para cada subcuenca, junto a la precipitación anual de cada una.

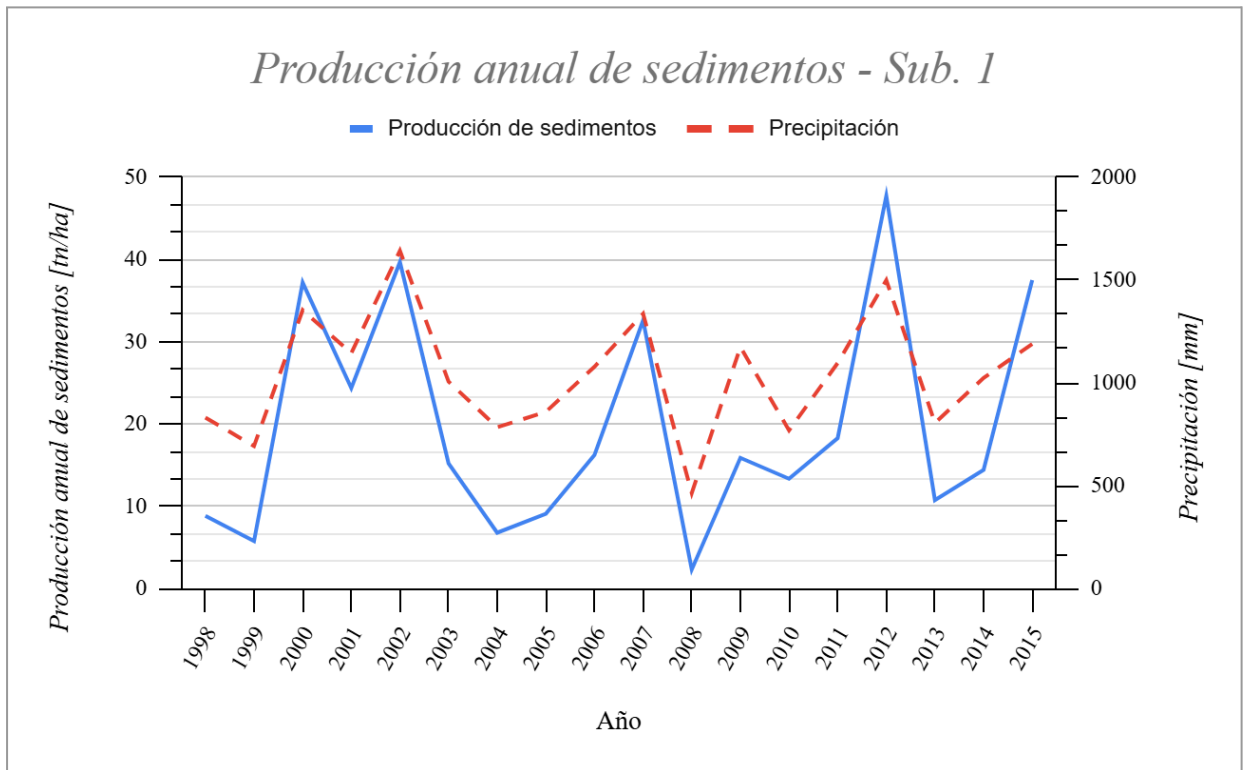


Figura 6.8. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 1.

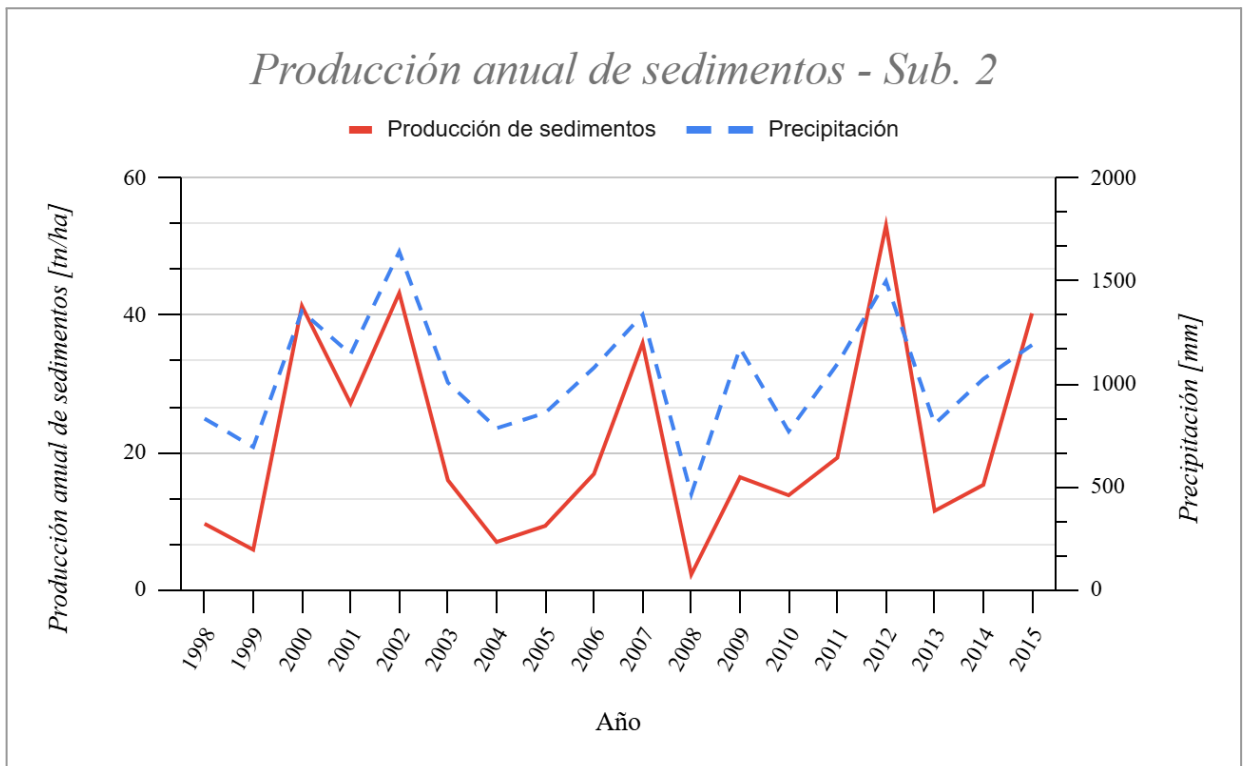


Figura 6.9. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 2.

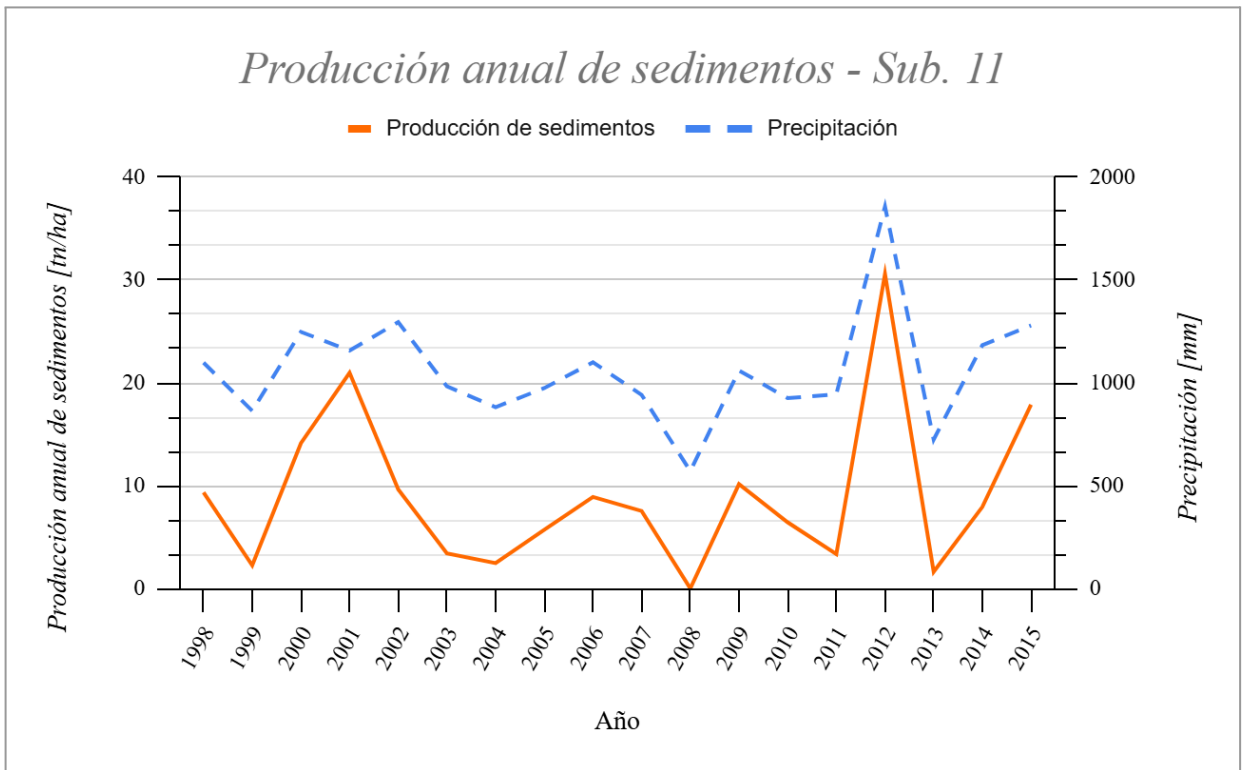


Figura 6.10. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 11.

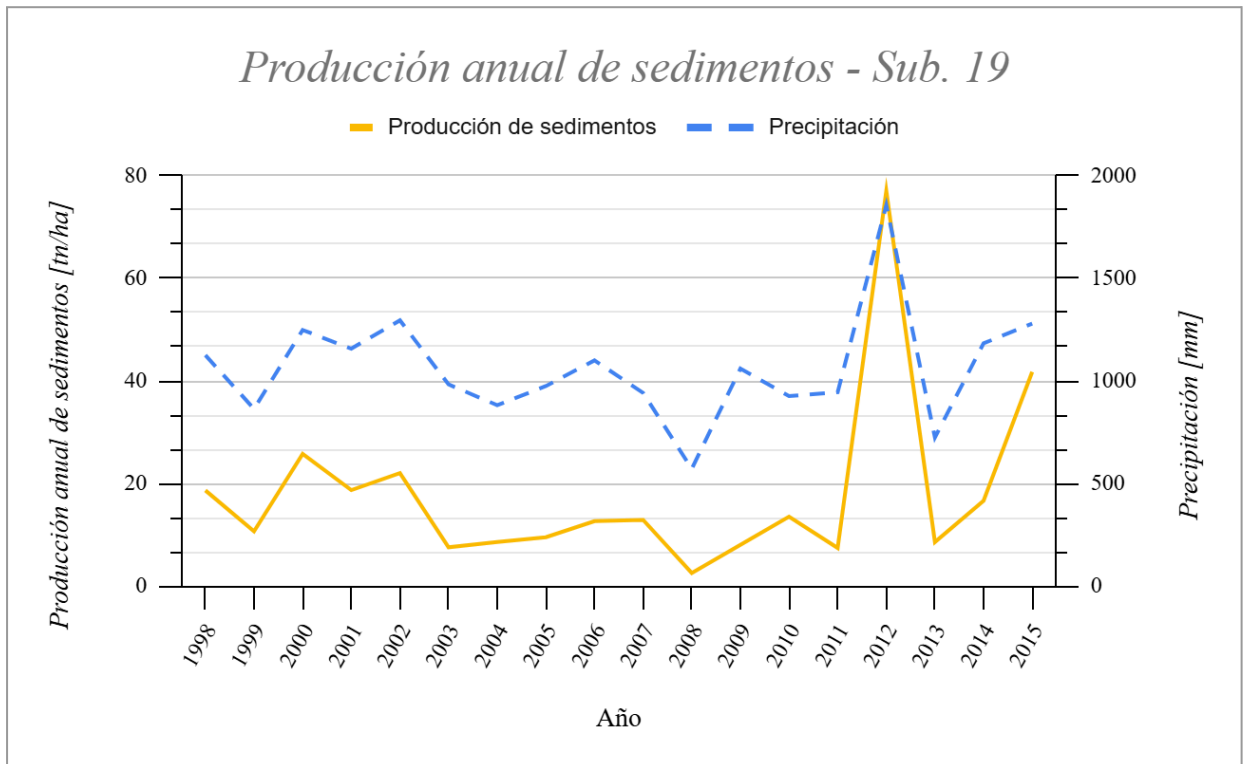


Figura 6.11. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 19.

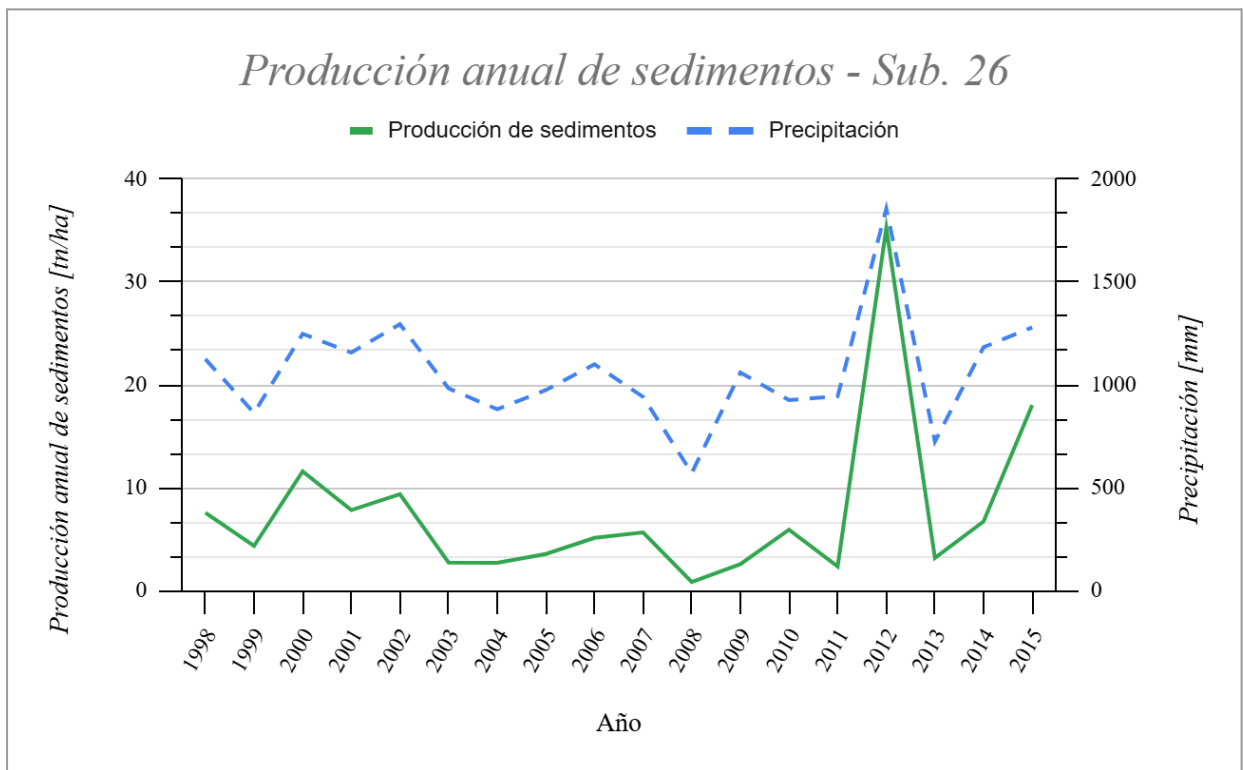


Figura 6.12. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 26.

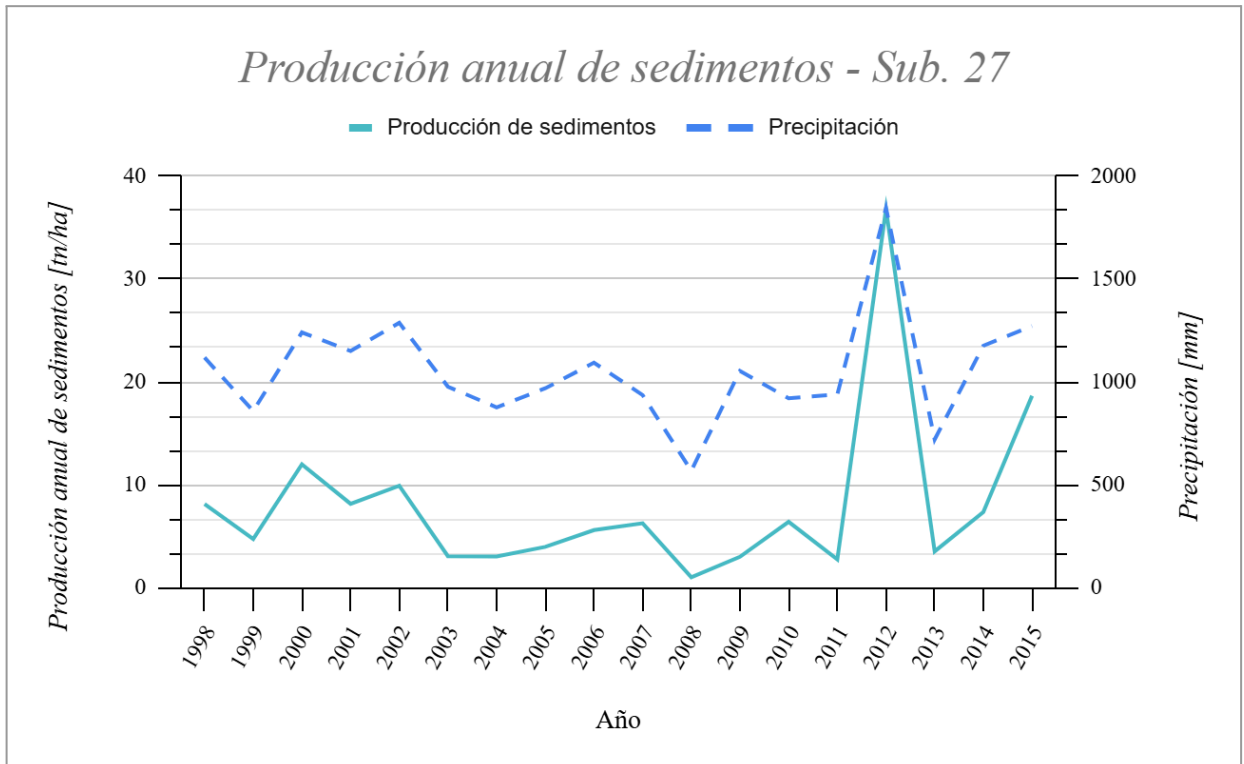
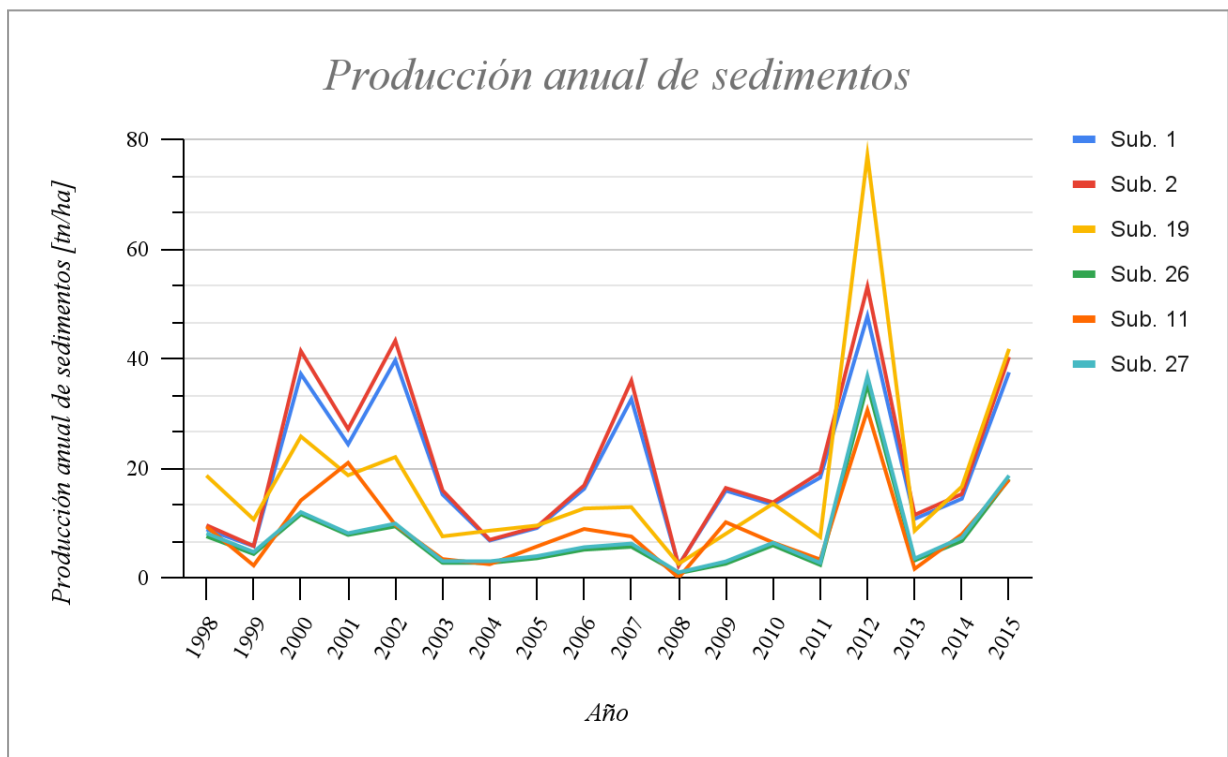


Figura 6.13. Producción anual de sedimentos de la subcuenca 27.

Se puede observar que, para cada subcuenca, la variación de la producción de sedimentos es similar a la de la precipitación, coincidiendo con lo mencionado anteriormente acerca de la estrecha relación entre estos valores.

En la *Figura 6.14*, se presenta la variación de la producción de sedimentos anual para las seis subcuencas, donde es posible observar que aquella que presenta el valor más elevado es la subcuenca 19, donde se encuentra ubicada Villa Eloisa, sin embargo, la subcuenca número 2, en la cual se encuentra emplazado Oliveros, es la que, para el periodo de 1998 a 2015, presenta una producción de sedimento acumulada más elevada, como es posible observar en la *Figura 6.15*. Además, también se evidencia que la distribución de la producción de sedimentos para las seis subcuencas es muy similar, coincidiendo en aquellos años con valores picos y mínimos, y todas tienden a experimentar un nuevo pico a partir del año 2015, donde finaliza el análisis de esta simulación, pudiendo inferir que en los años posteriores la producción de sedimentos sea elevada. Se tiene el siguiente promedio anual para cada subcuenca:

- Subcuenca 1: 19,78 tn/ha/año
- Subcuenca 2: 21,33 tn/ha/año
- Subcuenca 11: 9,03 tn/ha/año
- Subcuenca 19: 17,93 tn/ha/año
- Subcuenca 26: 7,52 tn/ha/año
- Subcuenca 27: 8,01 tn/ha/año



*Figura 6.14. Producción anual de sedimentos de las seis subcuencas a analizar.*

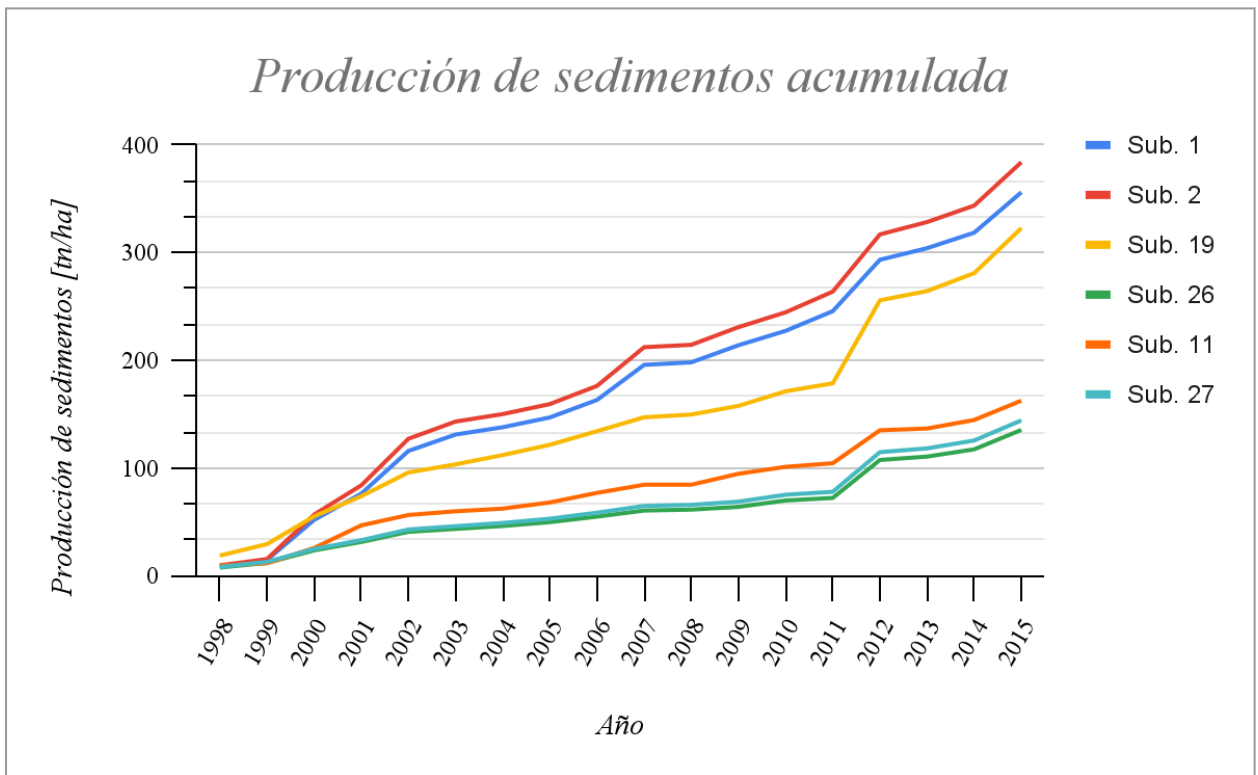


Figura 6.15. Producción anual de sedimentos acumulada de las seis subcuencas a analizar.

Es evidente la fuerte influencia de la pendiente en esta variable de salida, donde aquellas subcuencas con pendiente alta experimentan entre un 50% y un 60% de incremento en la producción de sedimentos acumulada al final del periodo, frente a la experimentada por aquellas subcuencas con pendiente baja.

A su vez, del análisis surge que las producciones anuales más importantes de estas subcuencas se dan en el año 2012, año asociado a importantes lluvias. Si se analiza cada subcuenca en dicho año (Figuras 6.16. a 6.21.) se puede observar nuevamente una tendencia similar a la precipitación experimentada, presentándose un pico elevado en todas en correspondencia con el mes de octubre, donde se observa la máxima precipitación del año 2012, y valores prácticamente nulos en los meses de junio y julio, donde se observan las precipitaciones más bajas.

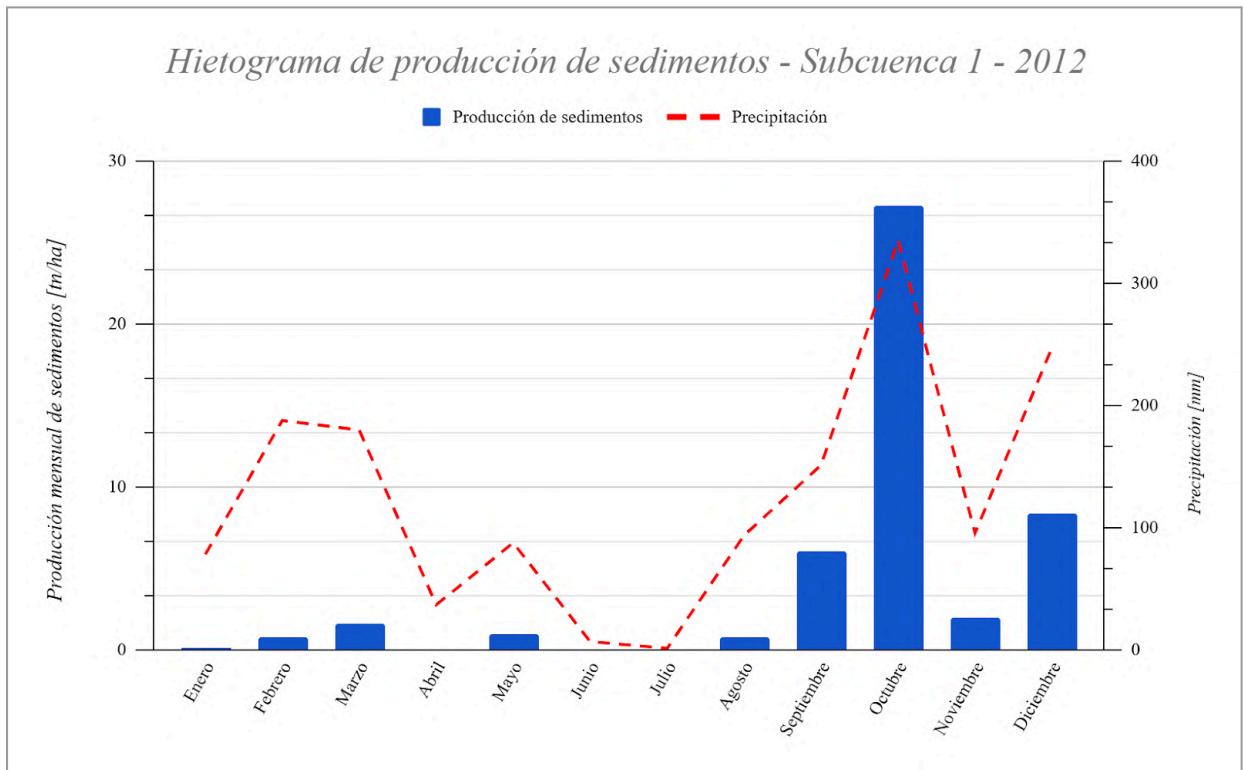


Figura 6.16. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 1 para el año 2012.

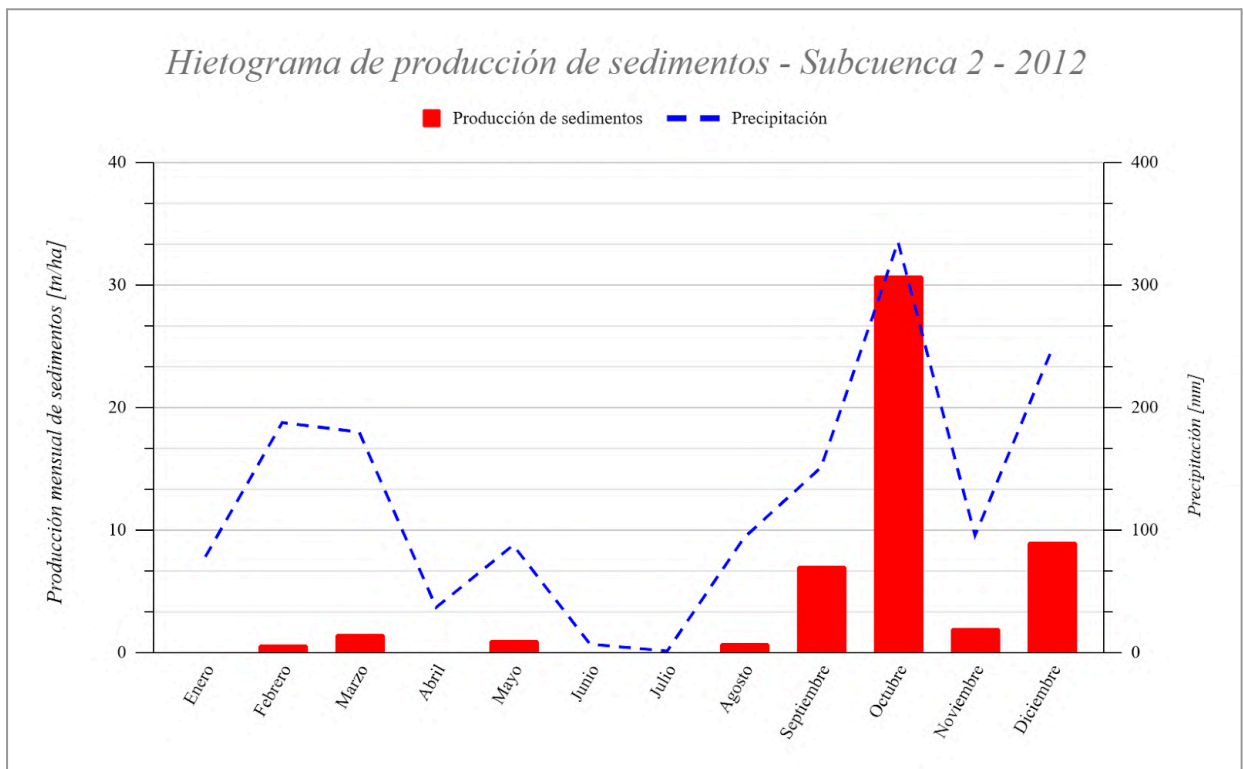


Figura 6.17. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 2 para el año 2012.

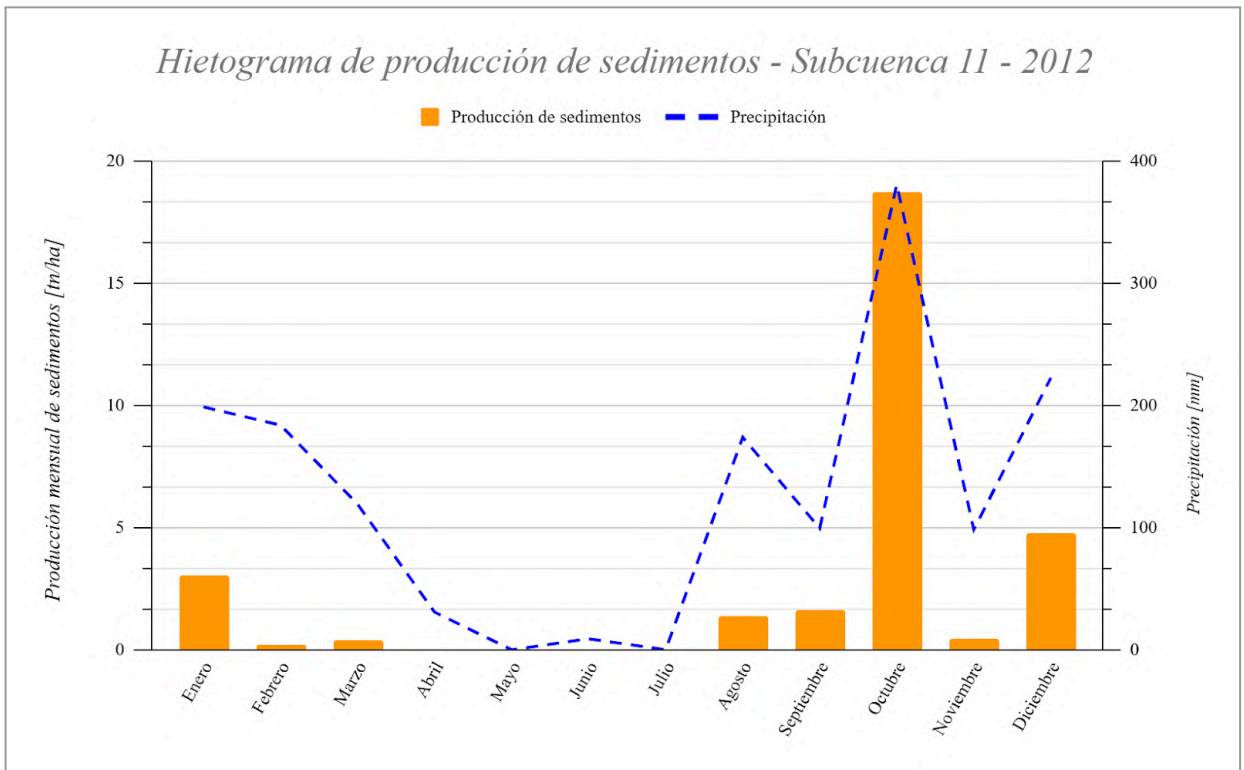


Figura 6.18. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 11 para el año 2012.

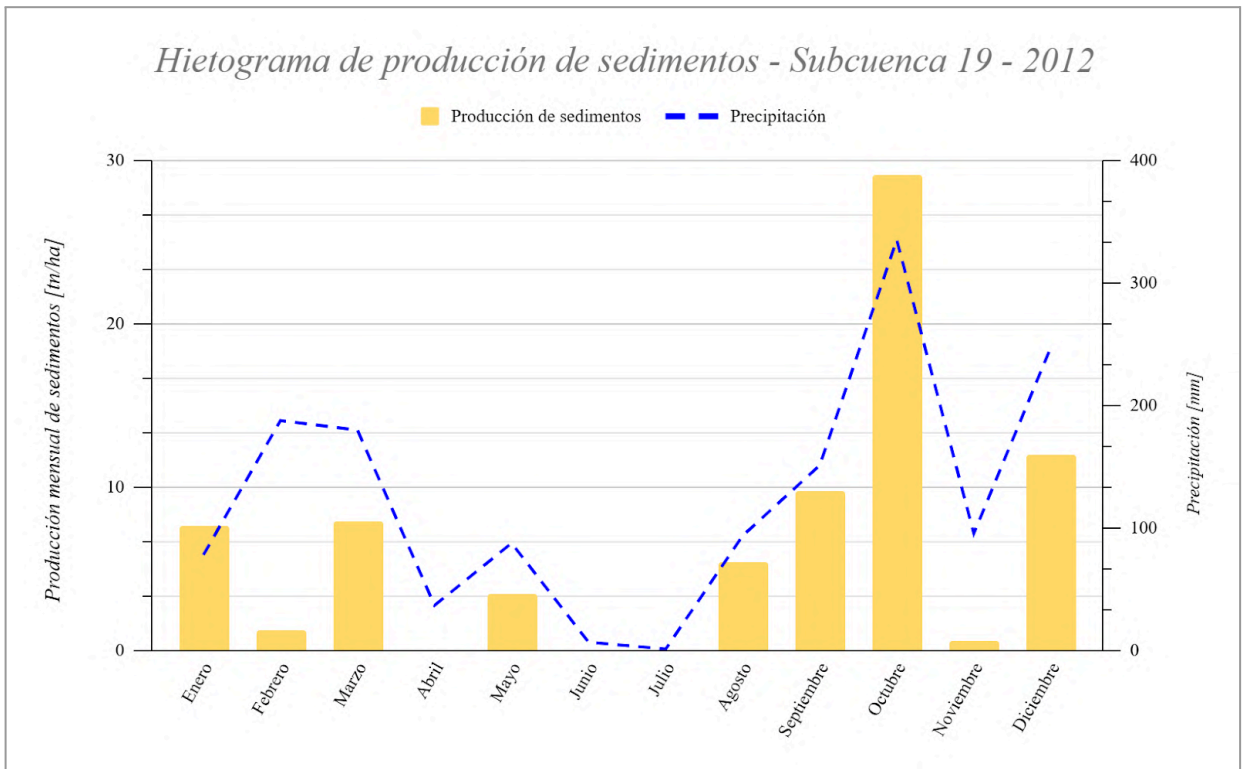


Figura 6.19. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 19 para el año 2012.

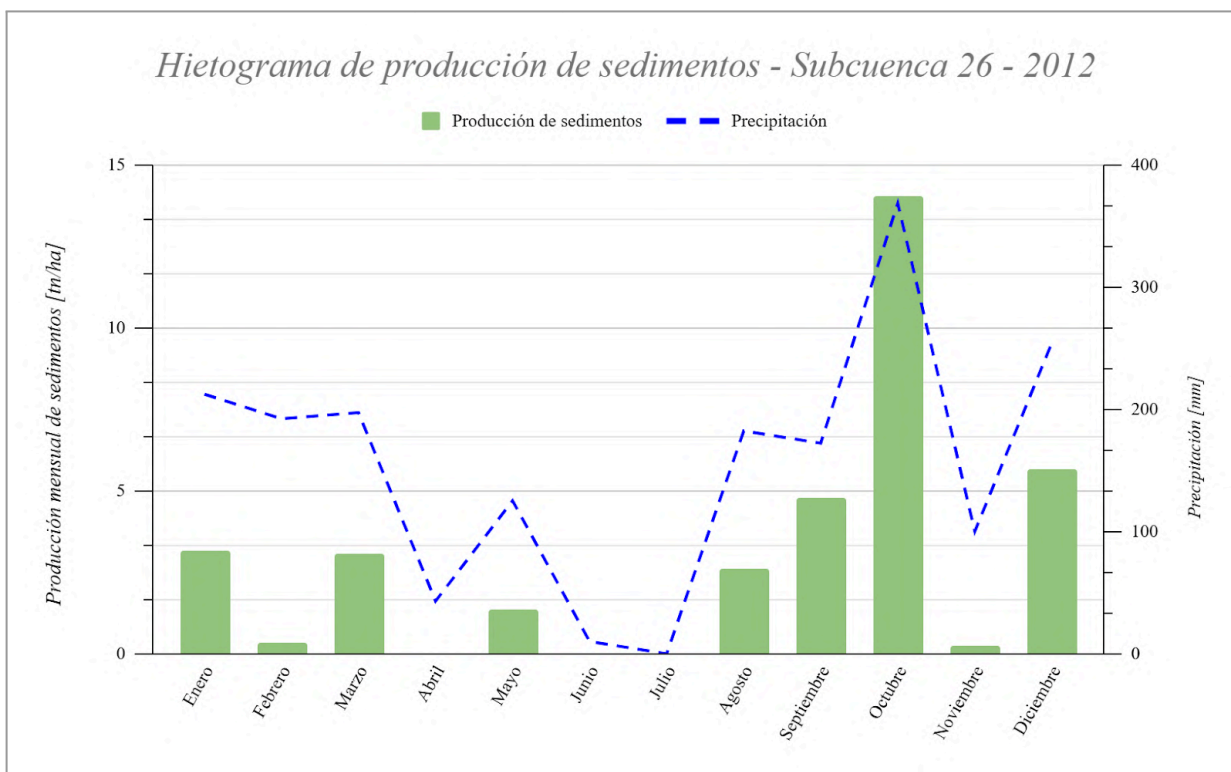


Figura 6.20. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 26 para el año 2012.

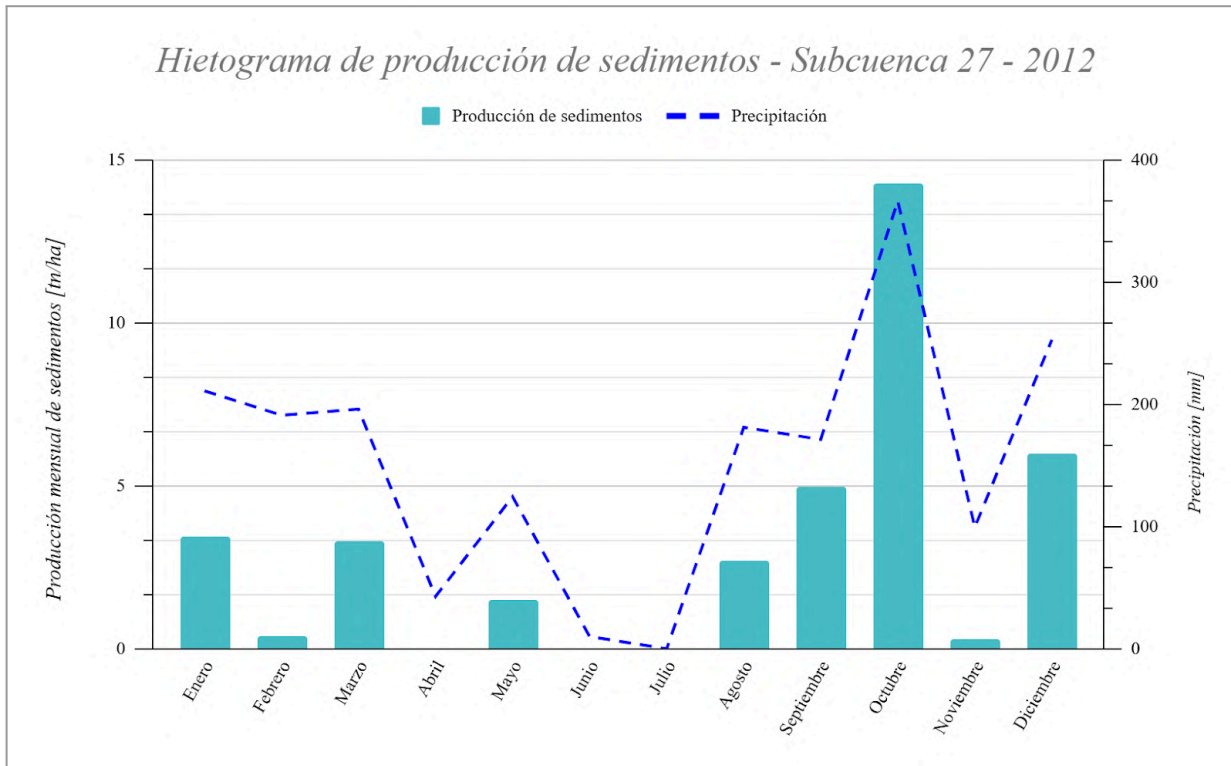
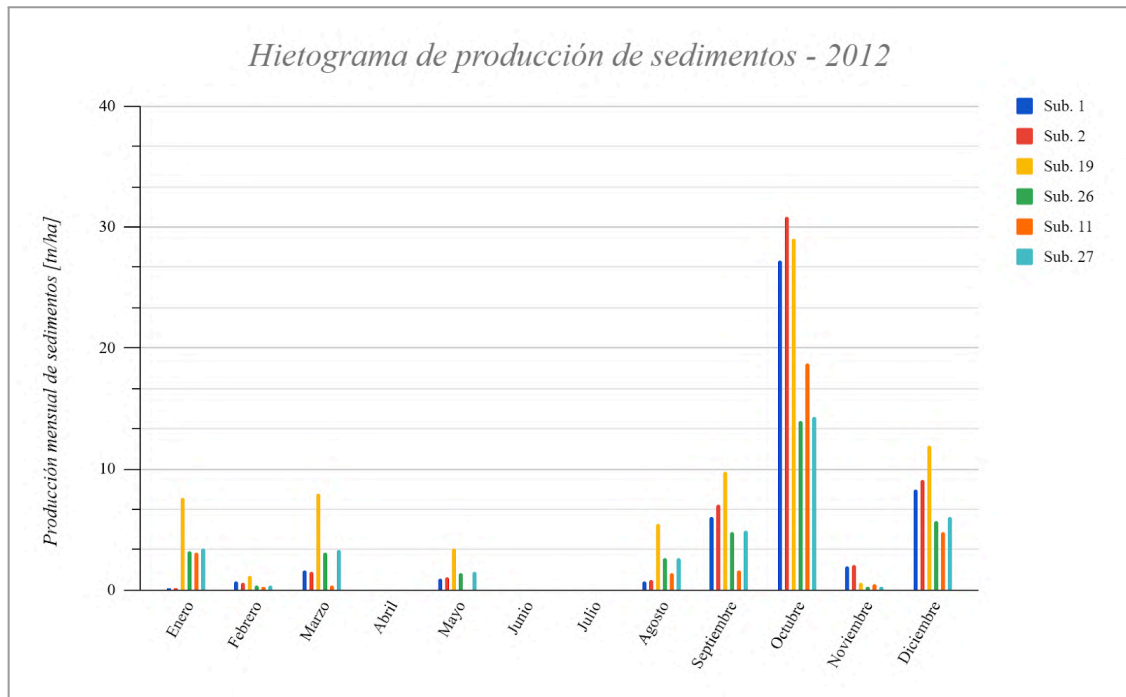


Figura 6.21. Hietograma de producción de sedimentos de la subcuenca 27 para el año 2012.

Como se observa en la *Figura 6.22.*, la subcuenca 2 presenta la máxima erosión mensual dentro de todas las subcuencas, a pesar de que la subcuenca 19 experimente la máxima anual del 2012.



*Figura 6.22. Hietograma de producción de sedimentos de las seis subcuencas para el año 2012.*

En resumen, aquellas subcuencas con mayores pendientes presentarán una mayor erosión en correspondencia con los periodos más lluviosos, y estas se encuentran mayoritariamente concentradas en la desembocadura del Carcarañá en el Río Coronda. También que, la diferencia con aquellas de menor pendiente es importante, con incrementos de hasta el 60% y que el año 2012 fue un periodo con importantes pérdidas de suelo para la cuenca.

De acuerdo a estudios realizados por el INTA y el Instituto de Suelos (*Gaitán, J. et. al., 2017*), para el territorio nacional se estima una tasa media de erosión hídrica actual de 6,2 tn/ha/año, lo que equivale a la pérdida de una capa de aproximadamente 0,5 milímetros de suelo por año. Si comparamos este valor con los promedios anuales obtenidos para la cuenca, se observa que todas las subcuencas analizadas presentan valores mayores, donde aquellas con pendiente alcanzan a triplicarlo, sin embargo, si observamos el mapa de la *Figura 6.23.* se observan para la zona de estudio importantes áreas con valor entre 5 y 10 tn/ha/año, coincidiendo más con los valores observados en subcuencas de baja pendiente.

En aquellas subcuencas de pendiente importante, no se observa una buena representación en la *Figura 6.27.*, donde su promedio según esta rondaría entre 0,5 y 2 tn/ha/año, observándose valores de hasta 22,30 tn/ha/año para la subcuenca 2, que presenta la mayor erosión acumulada en el periodo, lo que equivale aproximadamente 1,8 mm de suelo por año.

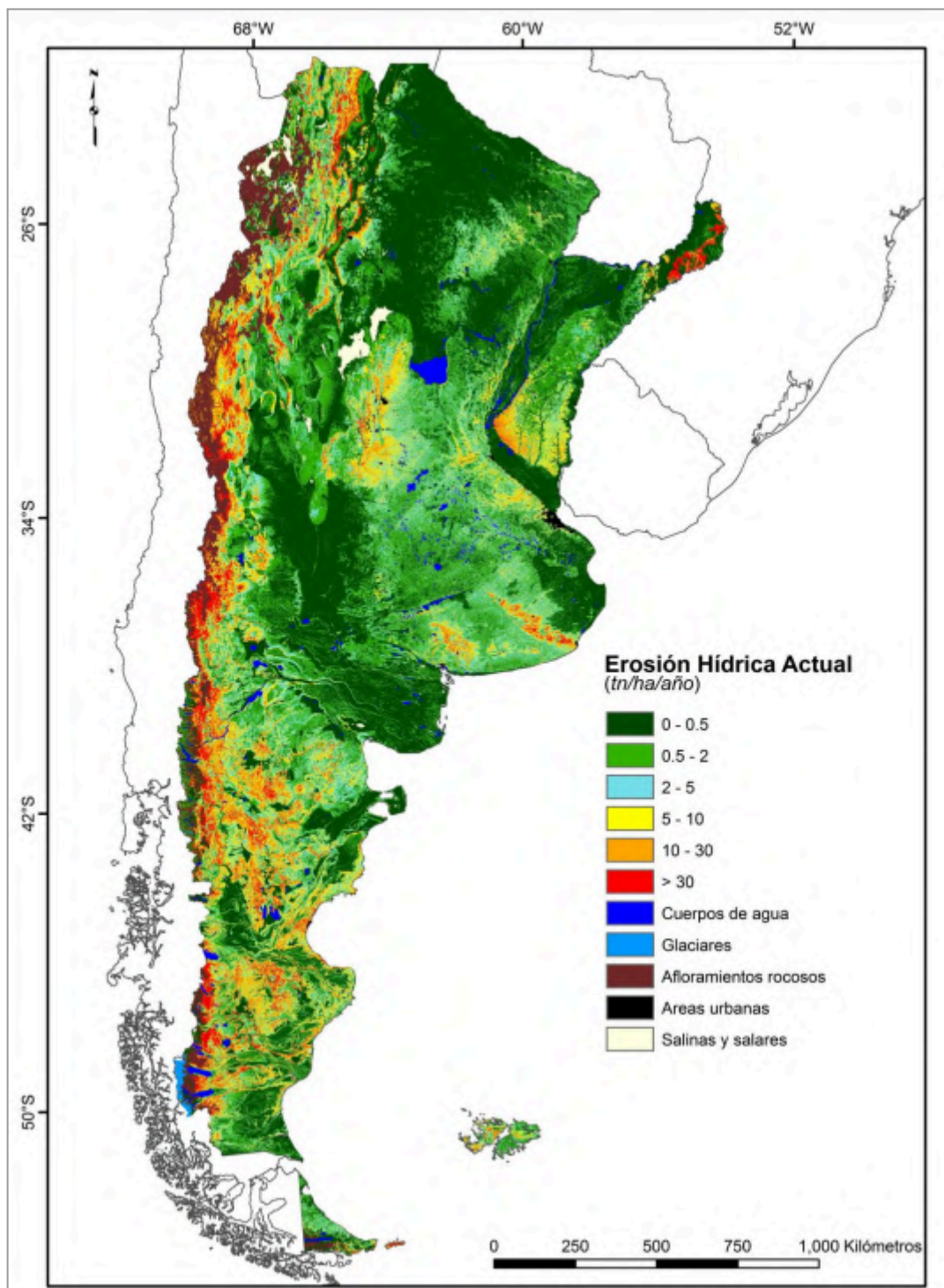


Figura 6.23. Erosión hídrica actual calculada con la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) en la República Argentina.

### **6.1.2. Inundaciones**

Otra de las problemáticas detectadas en la cuenca baja del Río Carcarañá son las inundaciones, como se evidencia en las *Tablas 6.2., 6.3. y 6.4.* Este sistema hidrológico se encuentra presenta en una llanura, por lo cual no es tan lineal la relación entre la precipitación y el escurrimiento superficial como puede ser para un sistema con elevadas pendientes, sino que existe una superposición de efectos de las distintas variables involucradas en los procesos de anegamiento.

La consecuencia puede ser desde la pérdida de bienes, principalmente, de acuerdo a la caracterización realizada, el principal uso de la región en estudio involucra la actividad agrícola principalmente, para la cual, las inundaciones generan pérdidas de cultivos, además de otros bienes. Pero sin perder el foco, la consecuencia más importante son las pérdidas de vida humana.

Para poder analizar este tipo de problemática se realizan, a los alcances de este proyecto y de acuerdo al relevamiento de datos secundarios realizado, se estudian distintas subcuencas con reporte de inundaciones en el primer semestre del año de 2015, 5 en total, cubriendo el rango completo de características morfológicas, y 2 para las cuales no se tenga antecedente de anegamiento y que por sus características se tome como hipótesis que las mismas son no inundables, es decir, preferentemente con mayor elevación y pendiente. En resumen, se estudia:

#### ***Subcuencas inundadas***

- Subcuencas 5 y 8 - Clasificadas como un bajo, *Tabla 5.33.*
- Subcuenca 13 - Clasificada como media-loma, *Tabla 5.33.*
- Subcuencas 10 y 24 - Clasificadas como loma, *Tabla 5.33.*

#### ***Subcuencas no inundadas***

- Subcuencas 21 y 22 - Clasificadas como loma, *Tabla 5.33.*

Se analizan las distintas variables involucradas en el balance hídrico, como SW, ET, PRECIP, etc., así como también la producción de sedimentos SYLD y FLOW\_OUT del curso principal, es decir, el Río Carcarañá, para cada subcuenca identificada.

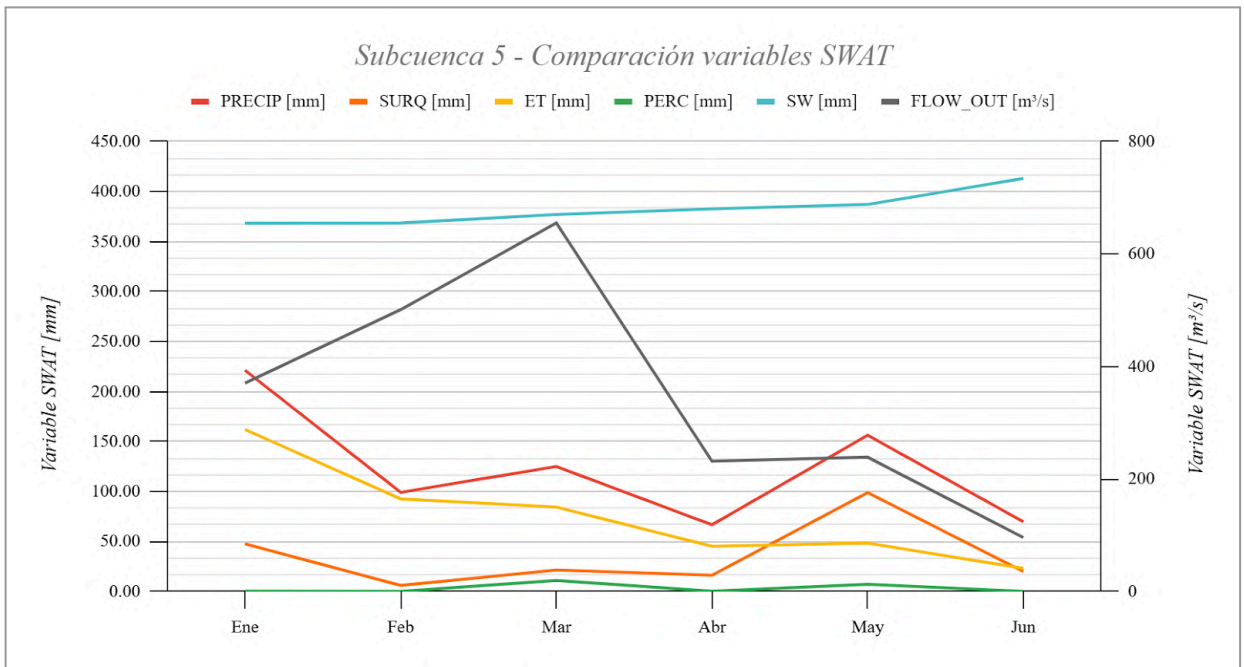


Figura 6.24. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 5.

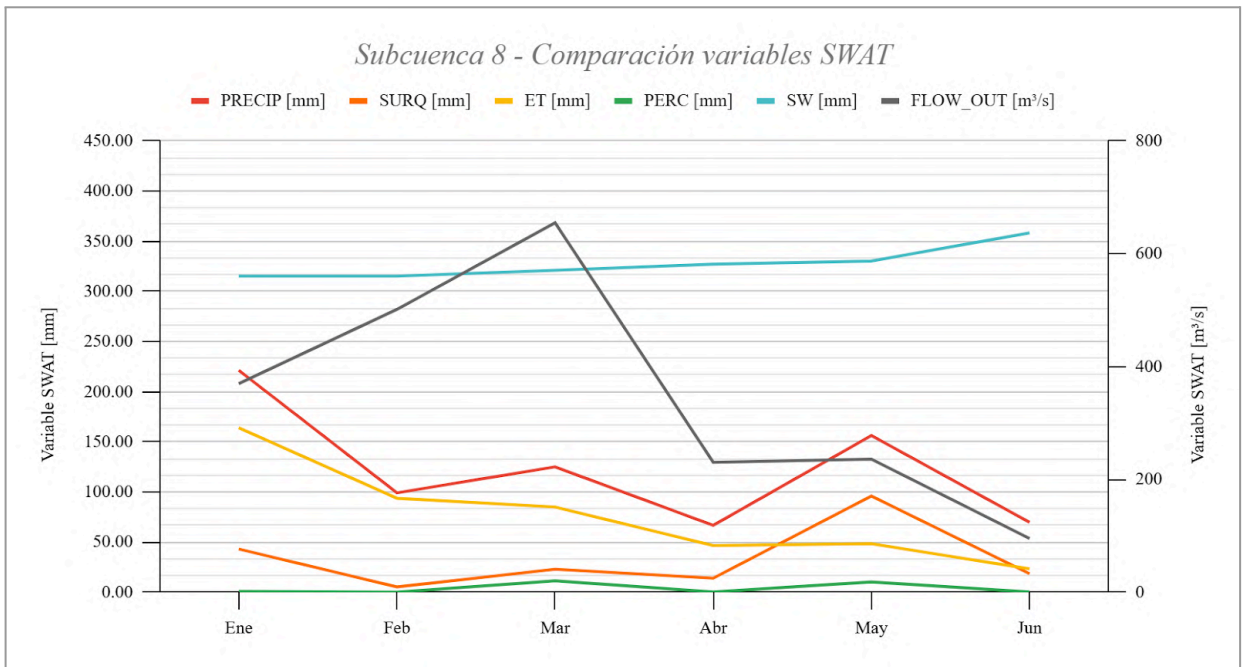


Figura 6.25. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 8.

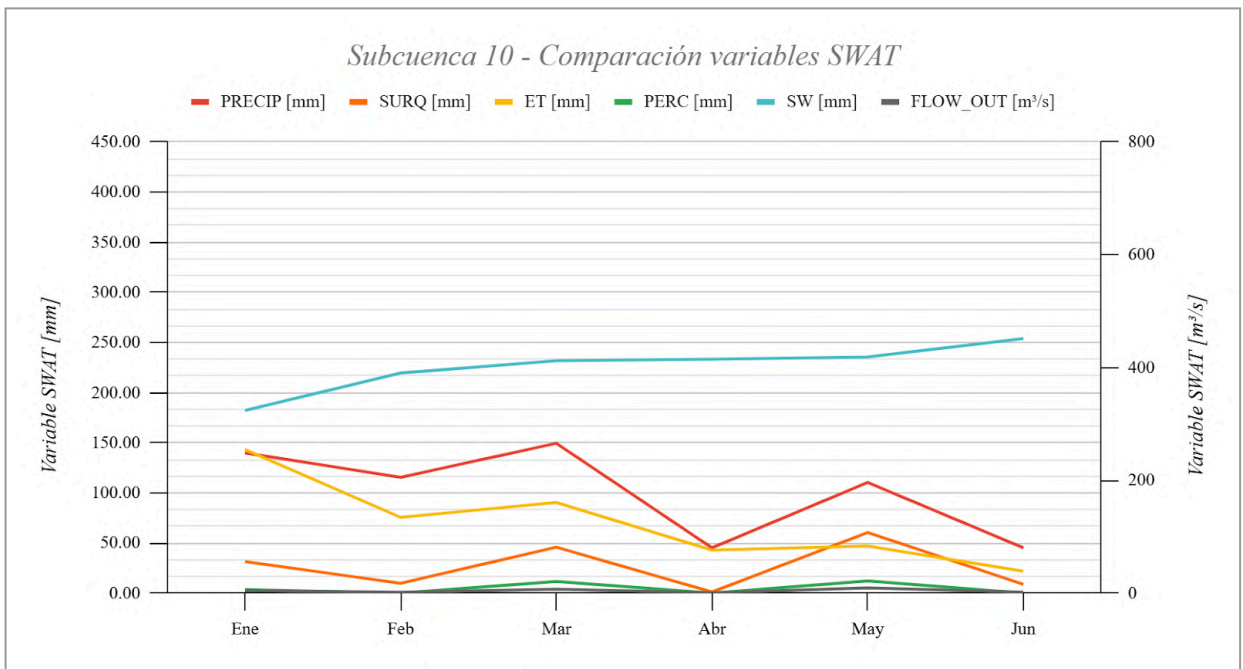


Figura 6.26. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 10.

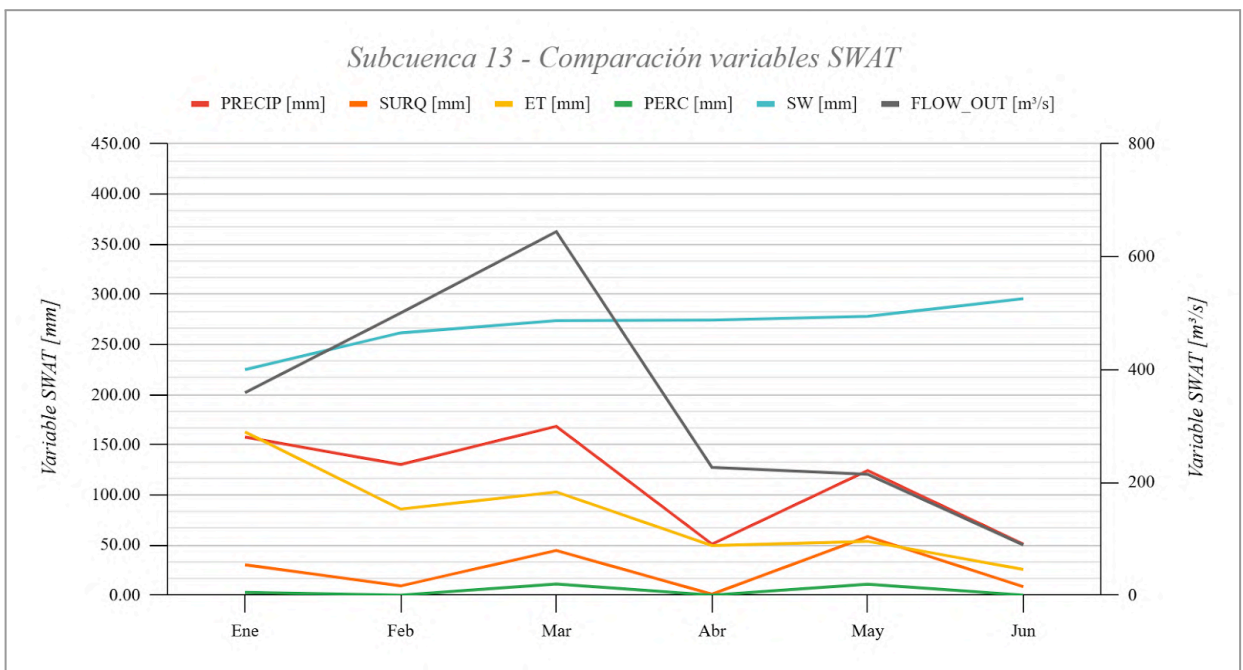


Figura 6.27. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 13.

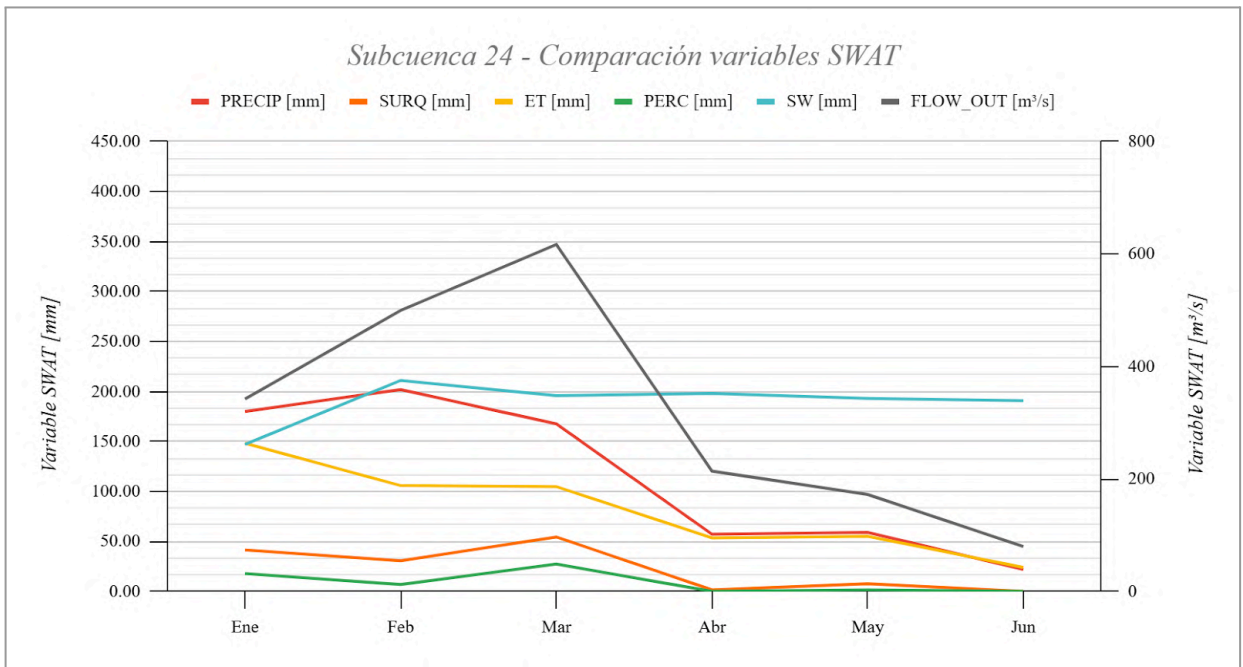


Figura 6.28. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 24.

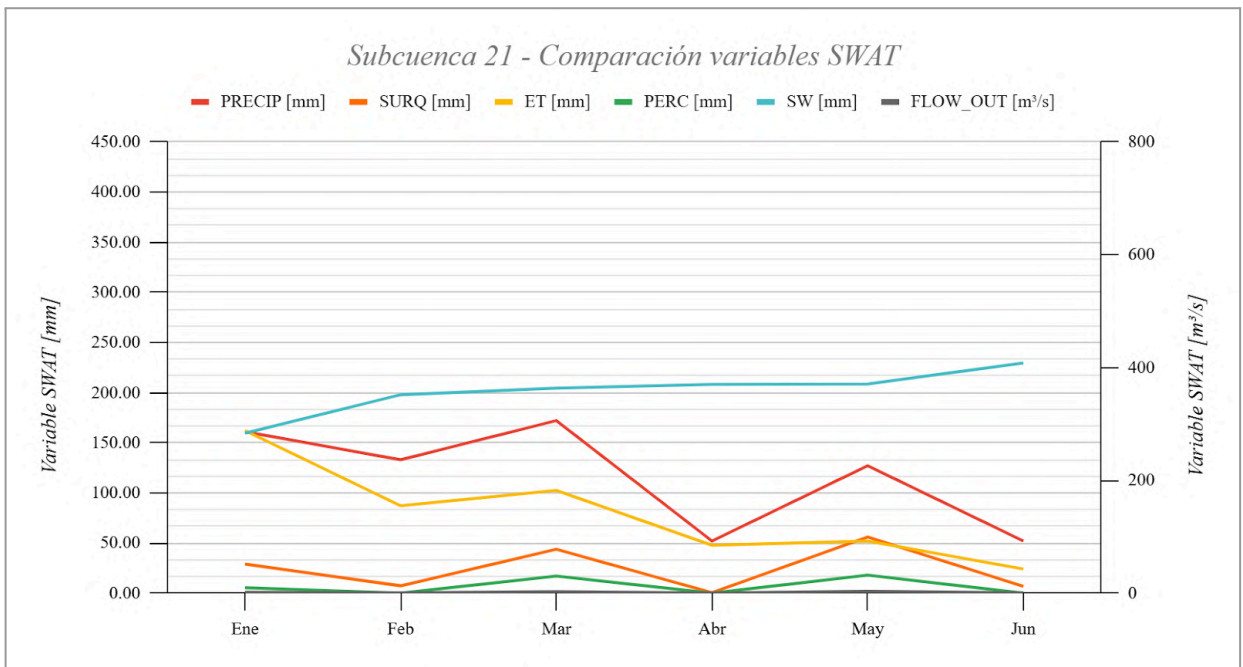


Figura 6.29. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 21.

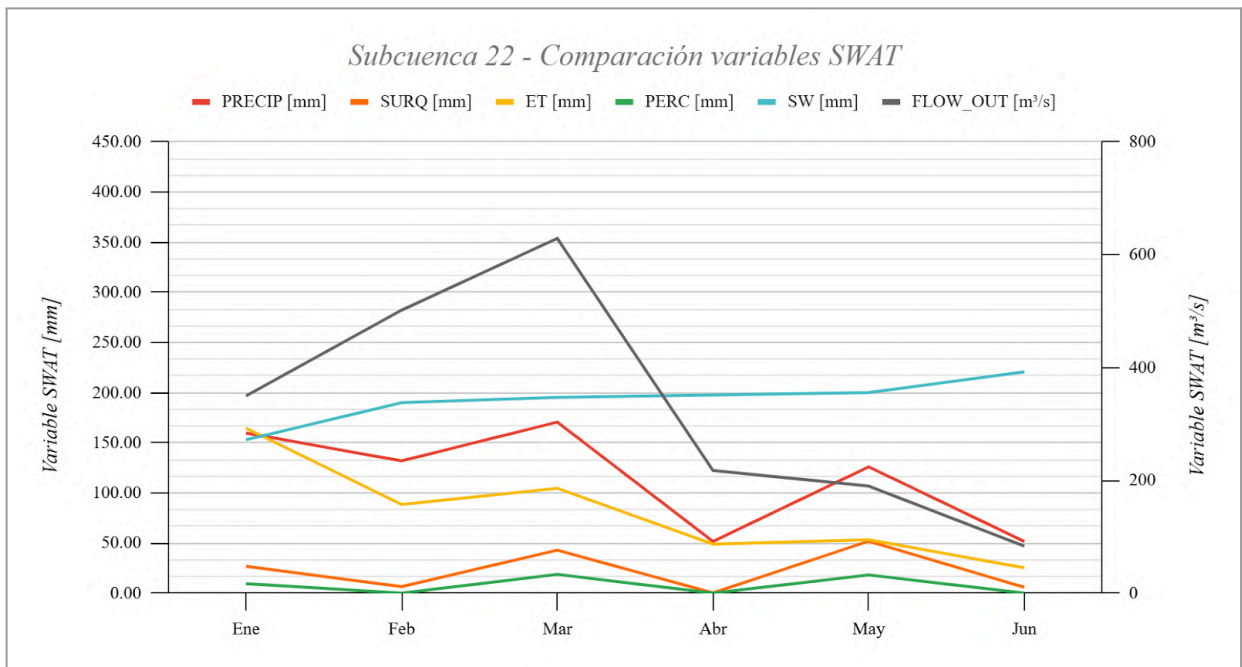


Figura 6.30. Análisis de variables SWAT asociadas a inundaciones - Subcuenca 22.

A continuación se presenta el análisis de las Figuras 6.24 a 6.30. En primer lugar, analizando la variable FLOW\_OUT, es decir, el escurrimiento del flujo del cauce principal de la cuenca, en la sección de cierre de cada subcuenca involucrada se detecta que los valores máximos identificados por el modelo, suceden en marzo de 2015, en concordancia con las antecedentes de inundaciones relevadas.

Respecto a las precipitaciones (PRECIP), en general, son mayores en la primera mitad del semestre (enero, febrero y marzo) con valores mensuales elevados, superiores a los 100 mm, generando un acumulado mayor respecto a la segunda mitad del semestre.

Analizando la humedad en el suelo SW, se identifica que los bajos (Subcuencas 5 y 8) se diferencian de forma notable del resto, con valores superiores a 300 mm, como resultado de un prolongado periodo húmedo, lo cual probablemente pueda generar una situación crítica de saturación del suelo, recordando que son zonas de baja elevación con la posibilidad de que el nivel freática se presente cercano a la superficie, dando lugar a afloramientos en la superficie, es decir, mayor probabilidad de inundaciones en las mismas. Luego, siguiendo la lógica, la humedad en el suelo disminuye al aumentar la elevación de la subcuenca analizada, presentando los menores valores para las cuencas consideradas no inundables, es decir, 21 y 22. Esto explica, la baja percolación (PERC) en los bajos, demostrando el elevado grado de saturación del suelo, agotando su capacidad de almacenamiento, disminuyendo los procesos hídricos verticales.

Es decir, se verifica el balance hídrico, como es de esperarse, con la evapotranspiración real ET disminuyendo y el escurrimiento superficial SURQ en aumento, a medida que se incrementa la humedad en el suelo. Es interesante observar que en verano, cosecha gruesa, la planta está crecida por lo que ET es

más elevada y luego va disminuyendo al acercarse a los meses de cosecha marzo-abril, donde la planta se muere, no absorbe más agua, por lo cual aumenta el escurrimiento superficial, es decir SURQ.

Se concluye que existe concordancia entre antecedente de inundación del 2015 relevada y los resultados obtenidos mediante el modelo calibrado. Este proceso de validación se puede repetir para otros años. También, cada una de las variables se analizan de forma individual para cada una de las subcuencas seleccionadas, para que el lector pueda tener otra fuente de comparación del mismo análisis.

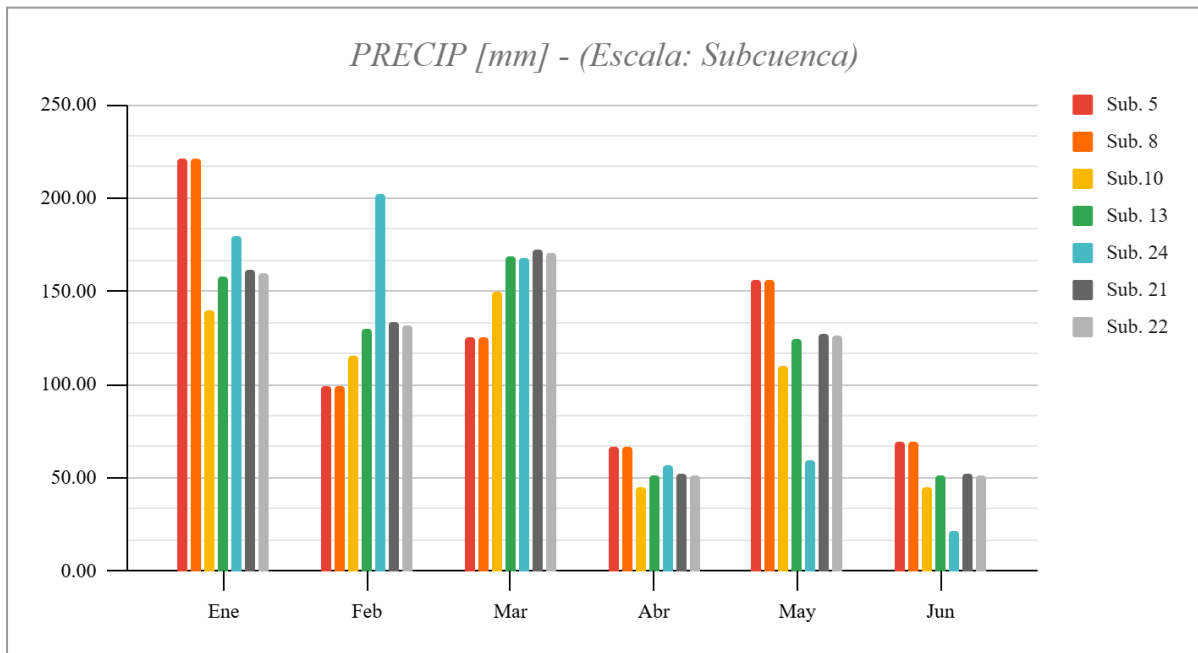


Figura 6.31. Análisis de variable PRECIP - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

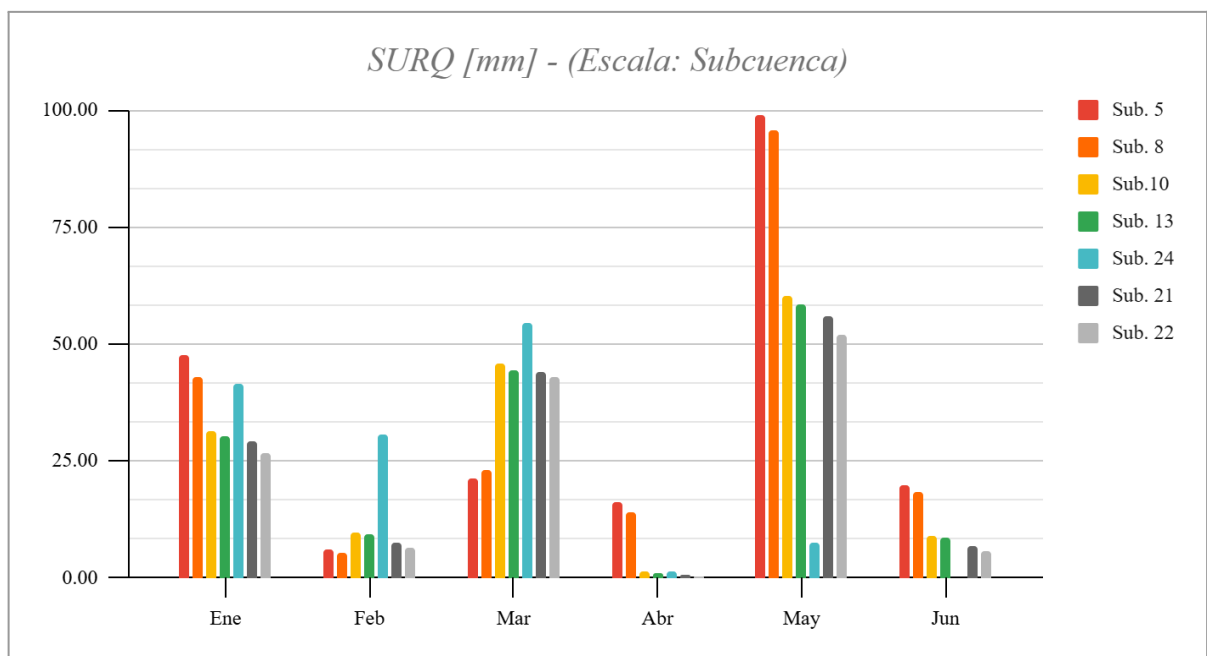


Figura 6.32. Análisis de variable SURQ - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

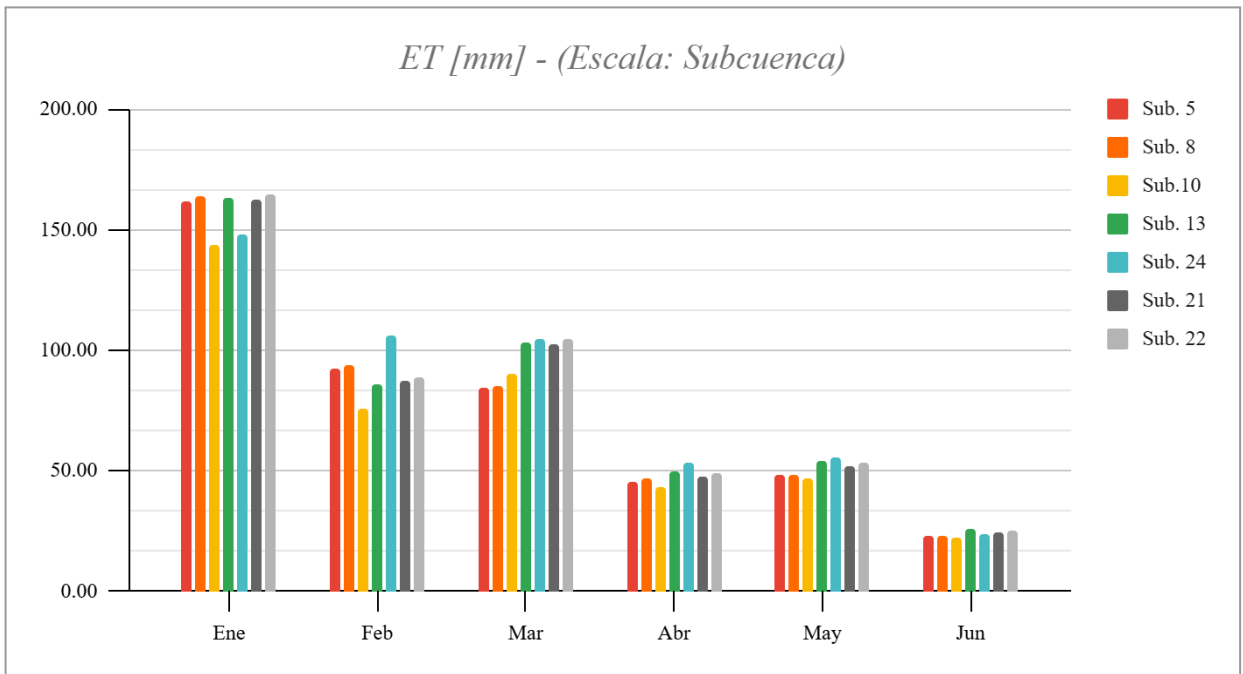


Figura 6.33. Análisis de variable ET - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

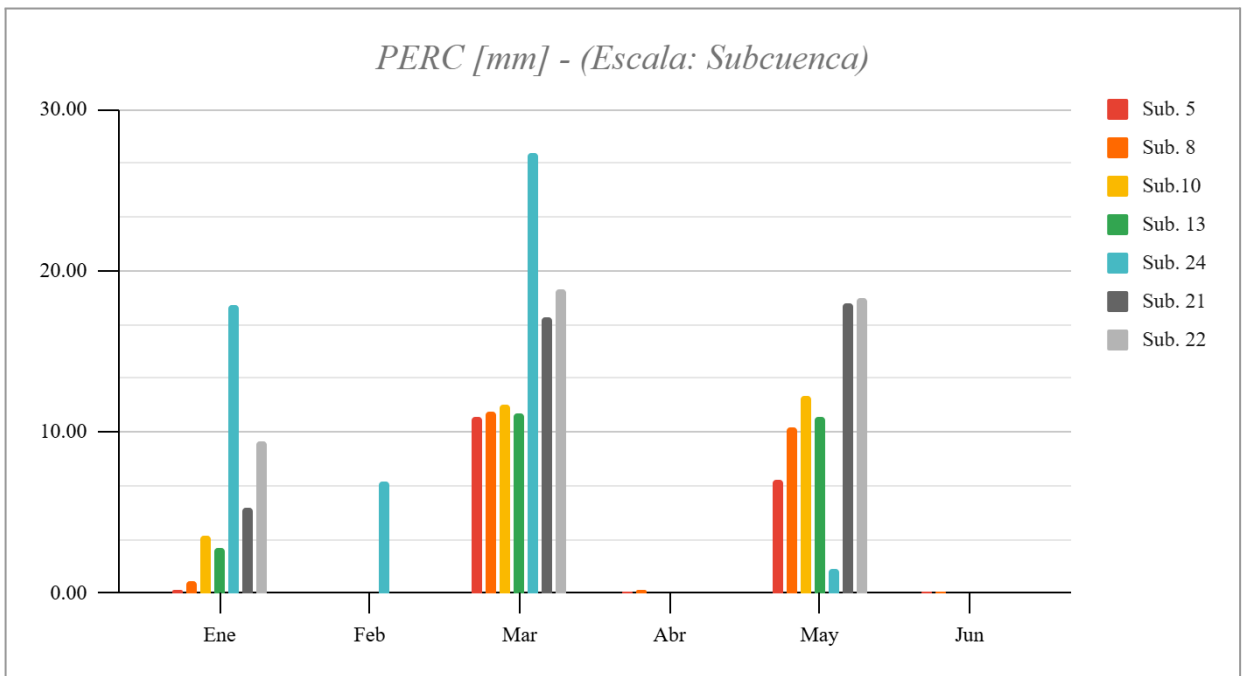


Figura 6.34. Análisis de variable PERC - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

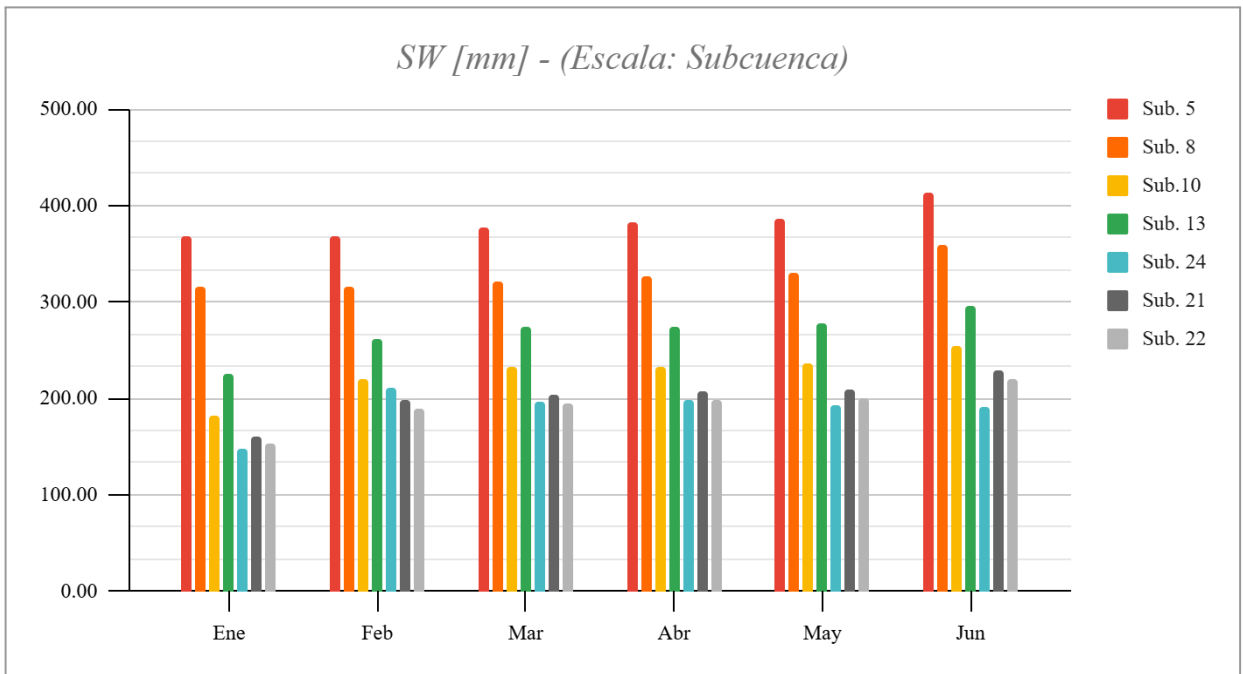


Figura 6.35. Análisis de variable SW - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

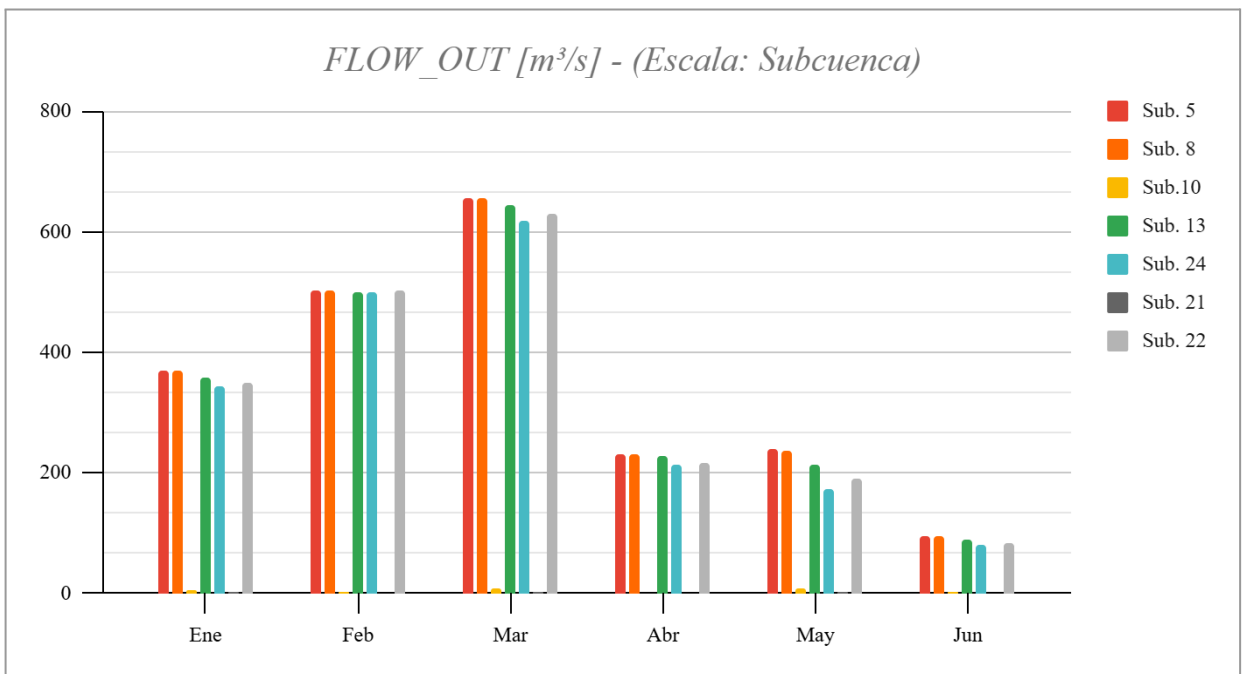


Figura 6.36. Análisis de variable FLOW\_OUT - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

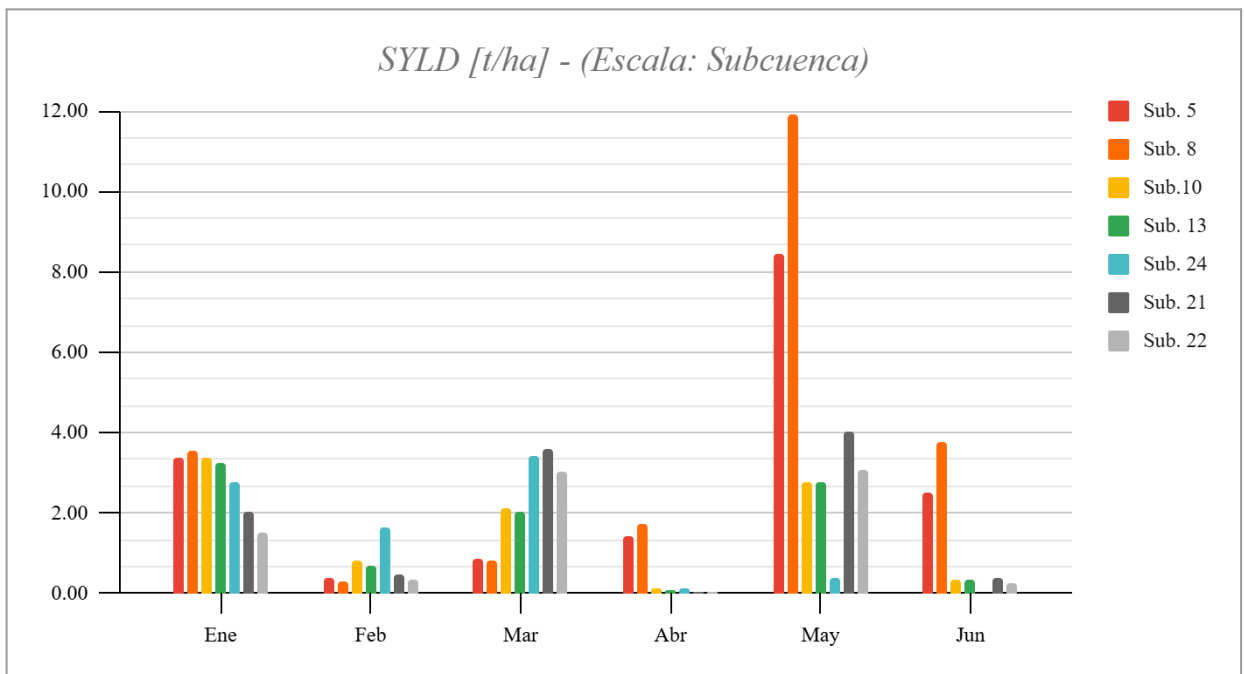


Figura 6.37. Análisis de variable SYLD - Primer semestre 2015, subcuencas indicadas.

Además de las conclusiones indicadas en el ítem anterior respecto a la producción de sedimentos, se evidencia a escala temporal mensual, que con el aumento del escurrimiento en la sección de cierre del cauce principal, hay un aumento de la erosión, por lo cual, consecuentemente un aumento en la producción de sedimentos luego de un evento lluvioso como el que se está analizando. Identificando así, una mayor producción de sedimentos en las cuencas aguas abajo, luego del evento.

### 6.1.3.Reducción de productividad del suelo

De acuerdo con lo analizado en las problemáticas que se presentan en la cuenca, el avance de las inundaciones, principalmente en el año 2015, provocó una importante pérdida en la producción de trigo, rondando cerca del 40% en dicha campaña.

Para analizar este problema se utiliza la salida output.mgt, donde se cuenta con la producción de trigo para cada HRU sembrada en todas las subcuencas para los distintos años de la simulación. Con estos datos se decide evaluar cómo varía esta variable de salida en una subcuenca que presenta inundaciones en el año 2015, como la subcuenca 13, y otra que no lo hace, como la subcuenca 22.

Para ello se realiza una ponderación areal de cada valor de producción, entre todas las áreas de los HRU sembrados, evaluando también cuál fue la superficie total sembrada, ya que ambas cuencas presentan distintas extensiones de superficie, resultando en las gráficas de las Figuras 6.38. y 6.39.

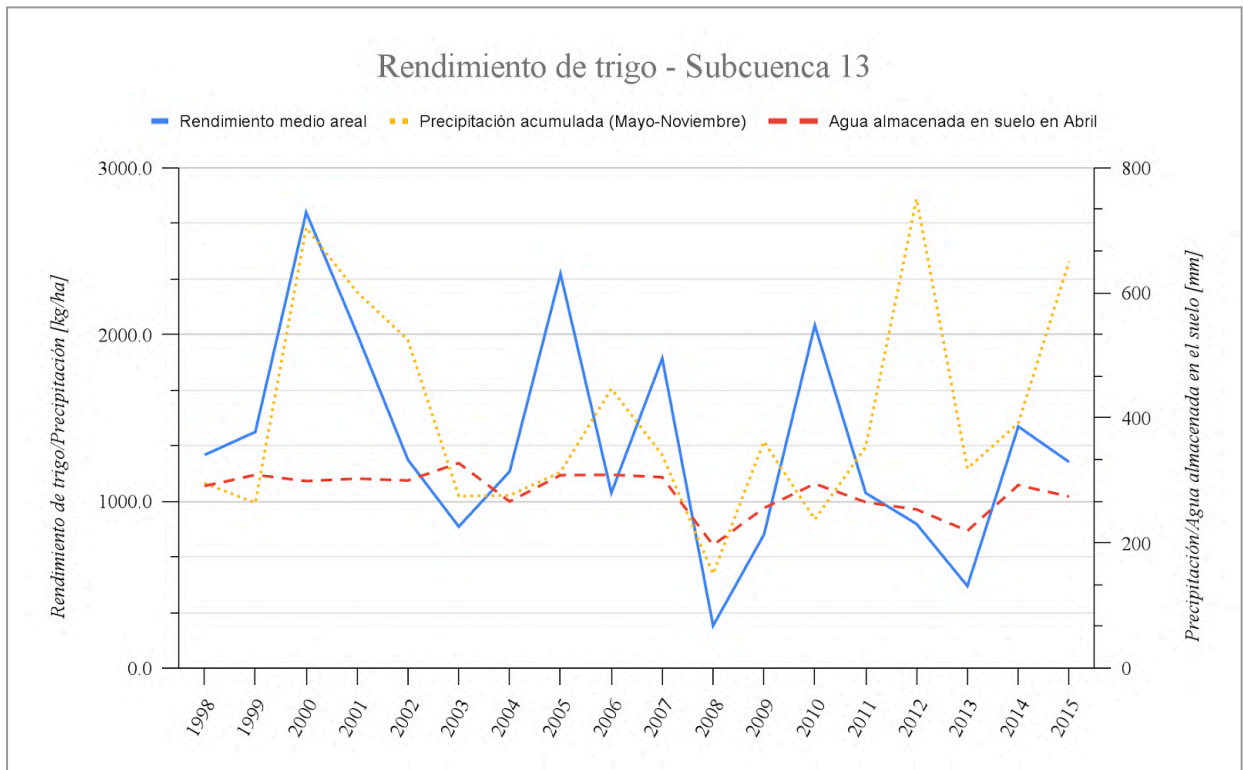


Figura 6.38. Rendimiento de trigo de la subcuenca 13.

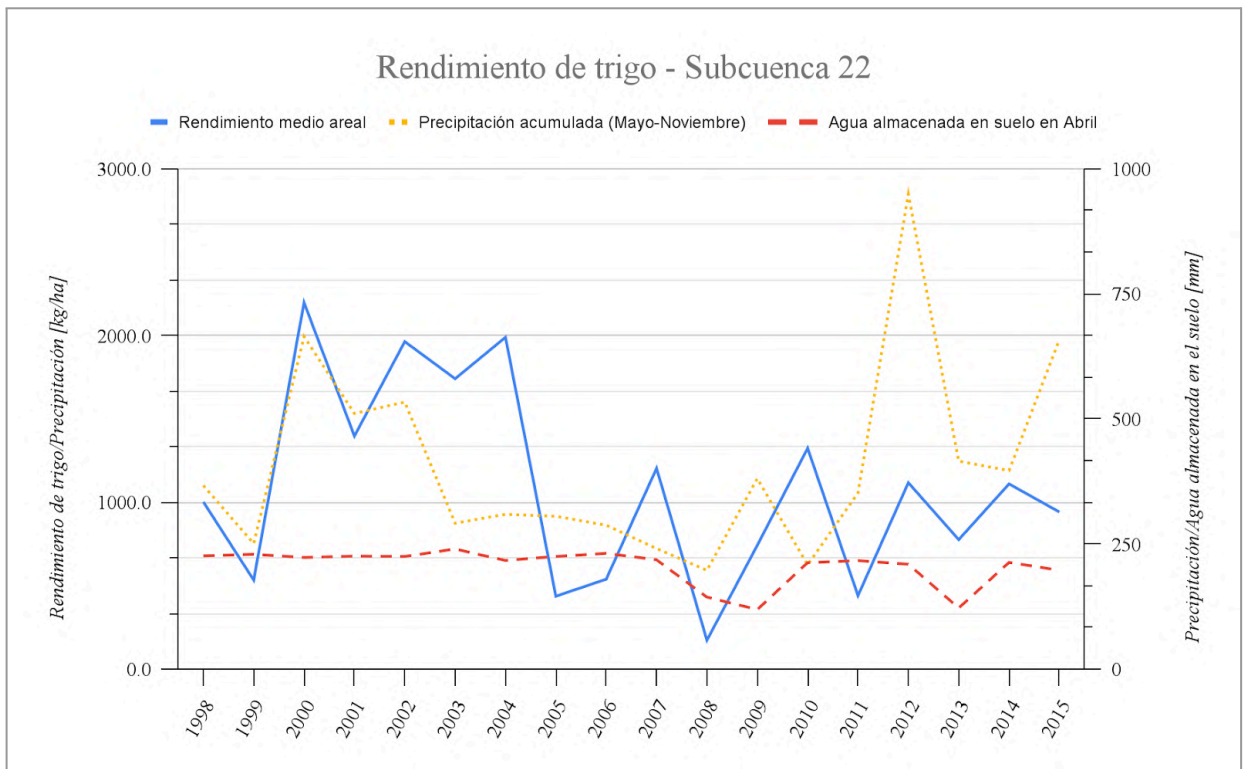


Figura 6.39. Rendimiento de trigo de la subcuenca 22.

Es importante tener presente la reducción que experimenta la superficie sembrada a partir del año 2008, producto de la crisis del campo, donde se incrementaron las retenciones al agro y se implementaron restricciones a las exportaciones, provocando que los productores entraron en conflicto con el gobierno, esto puede evidenciarse en las Figuras 6.40. y 6.41. También se asocia a importantes sequías sufridas en estos periodos en la provincia de Santa Fe, la expansión del cultivo de soja y la práctica de monocultivo, que fue desplazando al cultivo de trigo.

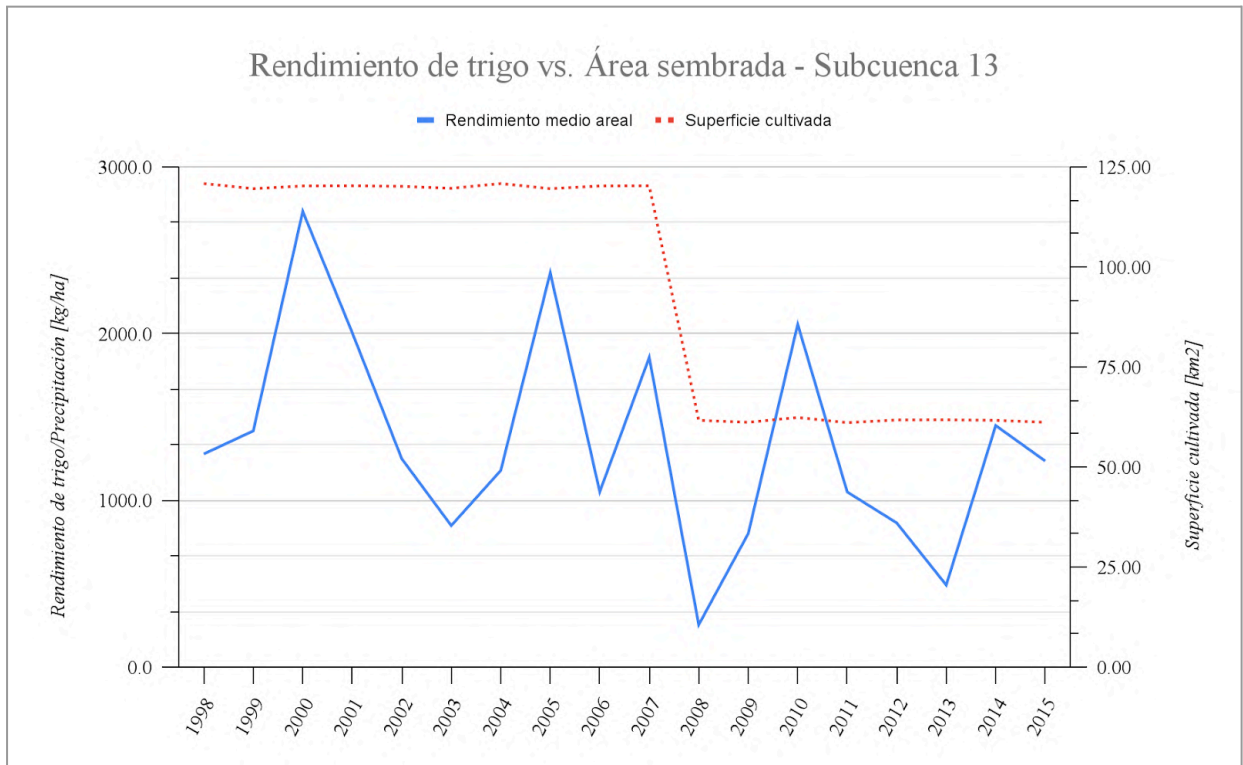


Figura 6.40. Variación del rendimiento del trigo con la superficie sembrada de la subcuenca 13.

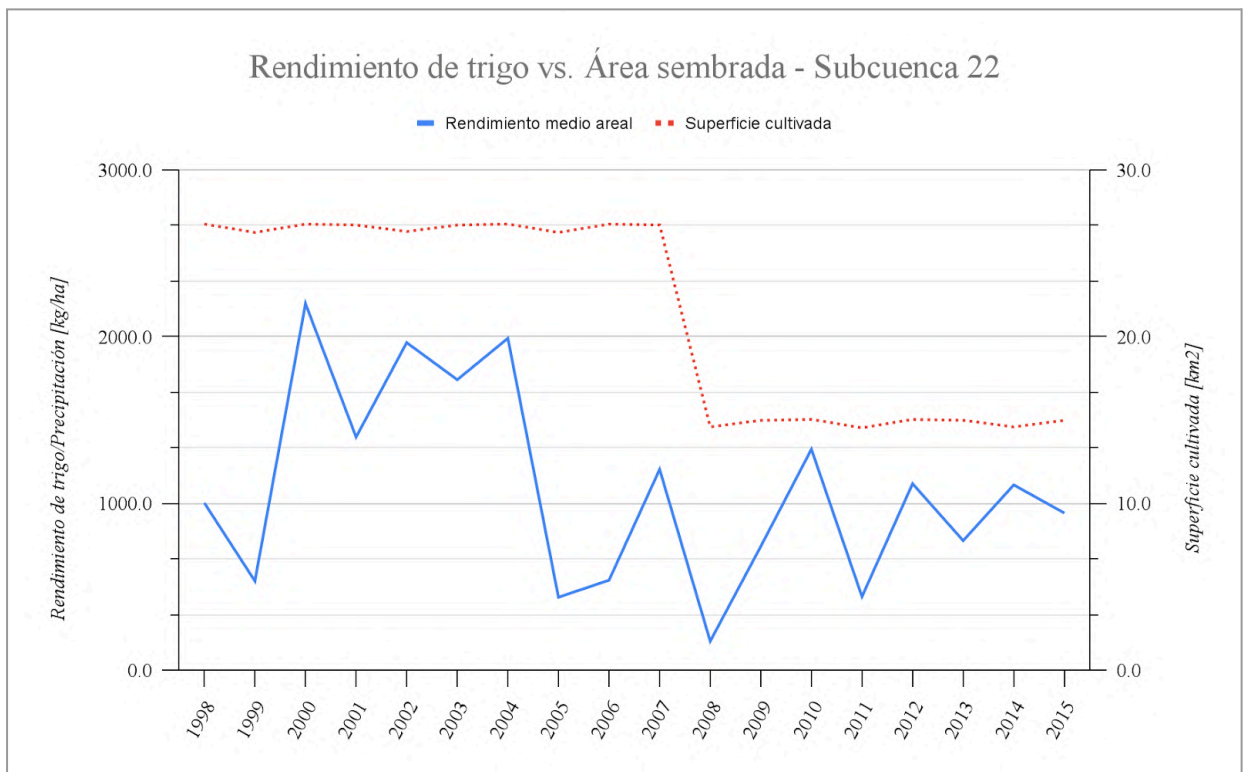


Figura 6.41. Variación del rendimiento del trigo con la superficie sembrada de la subcuenca 22.

Para ambas cuencas se observa una importante reducción del área sembrada a partir del año 2008, sumado a que, a partir de dicho año, la producción en la subcuenca 22 oscila en un rango acotado, mientras que para la subcuenca 13, se puede divisar un importante incremento hacia el 2010, que luego decrece fuertemente hasta llegado al año 2013. De todas maneras, la subcuenca que presenta inundaciones alcanza picos mucho mayores en las distintas campañas, sin embargo, en el último periodo se observa una importante disminución, llegando a valores similares a los de la subcuenca no anegada. En ambos casos, se presenta una disminución de la producción llegado a 2015, sin embargo, la tendencia es mucho más decreciente en aquella subcuenca anegada. en comparación con la no anegada.

De acuerdo a distintas campañas de trigo en el sur de la provincia de Santa Fe, se estima un rendimiento promedio de 3500 kg/ha, siendo que para estas subcuencas la tendencia resulta menor y en ningún periodo se alcanza dicho valor, se puede inferir que el software no está brindando resultados representativos de rendimiento.

En conclusión, si bien se observa una disminución en el rendimiento en dichos periodos de anegamiento, no resulta tan marcada como la expresada en las noticias referidas a esta problemática. Tampoco se distingue una marcada relación entre la producción y la precipitación.

## 6.2. Simulación de SWAT en período 2015-2024

Para el período 2015-2024 se realiza una simulación con los datos de entrada diarios y mensuales obtenidos, procesados y generados por el grupo de trabajo a lo largo del presente proyecto. Se debe destacar que se realiza una única corrida del modelo, con una duración aproximada de 20-40 minutos, o más, dependiendo de la capacidad de procesamiento de la computadora utilizada. Idealmente se realizan un gran número de simulaciones, como se ha comentado en el apartado número 5, lo que permite definir un espectro de variación de cada variable de salida en estudio, limitadas por un límite inferior y un límite superior. Sin embargo, si se toma una duración de simulación promedio de 30 minutos, por 500 simulaciones para analizar una variable de salida, se necesitan 15.000 minutos de simulación, es decir, aproximadamente 250 horas o aproximadamente 11 días completos, los cuales no se disponen durante el semestre de elaboración del presente proyecto.

Por lo tanto, en el análisis que se realiza a continuación, se debe tener en cuenta que se trata de una única simulación, es decir, una única combinación de valores de parámetros dentro del rango definido por Romagnoli et al. (2017), que generan una única salida de todas las combinaciones posibles la cual puede ser el límite inferior, el límite superior o cualquier del espectro, es decir, solo se observa un pequeño entorno dentro del espectro posible.

Por esta razón y porque además la variable con mayor cantidad de datos observados es el caudal en la sección de comparación en Pueblo Andino (*Figura 6.42.*), se analiza como variable de salida el escurrimiento del cauce principal en la sección de cierre de la subcuenca 8 (subcuenca de Pueblo Andino), identificada como *FLOW\_OUT* según la documentación teórica de SWAT.

La corrida fue realizada por el Ing. Franco Trivisonno, usando el modelo ya calibrado hasta 2015, correspondiente a su proyecto de extensión del modelo de Romagnoli et al. (2017).

Desde este momento en adelante, se denominan:

- $Q_{AFORO}$ : Caudales aforados por el SNIH.
- $Q_{SIM OBS}$ : Caudales obtenidos de la simulación realizada a paso diario con los datos de entrada generados durante la elaboración de este proyecto, identificados como datos observados.
- $Q_{SIM EST}$ : Caudales obtenidos de la simulación realizada a paso mensual con los datos climáticos de entrada generados por Canelo et al. (2024) y los caudales de entrada obtenidos mediante el método estimado utilizado por Romagnoli et al. (2017).

Y se realizan 3 análisis de resultados sobre las siguientes comparaciones:

- $Q_{AFORO}$  vs  $Q_{SIM OBS}$
- $Q_{SIM EST}$  vs  $Q_{AFORO}$
- $Q_{SIM OBS}$  vs  $Q_{SIM EST}$

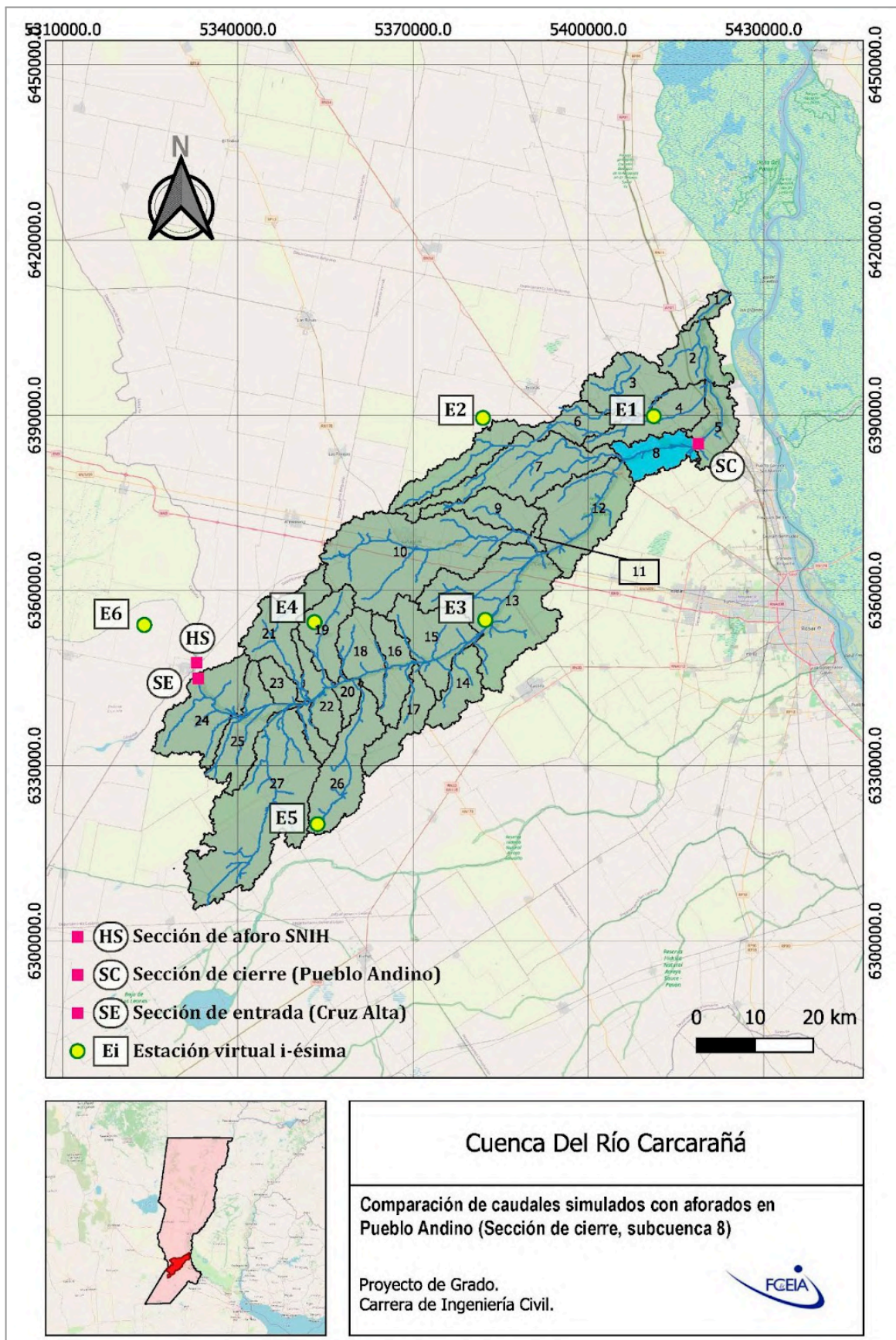


Figura 6.42. Subcuena, sección de análisis e inputs.

### 6.2.1. Comparación caudales simulados observados con aforados en Pueblo Andino.

Para comenzar con el análisis comparativo de los caudales resultantes de la salida del modelo ( $Q_{SIM OBS}$ ) y los caudales aforados ( $Q_{AFORO}$ ) en la localidad de Pueblo Andino es necesario realizar algunas aclaraciones previas.

- Los  $Q_{AFORO}$  se corresponden con valores medidos en días específicos en el período de estudio por el SNIH, teniendo tanta cantidad de valores como días en las que se hicieron dichos relevamientos de campo, dando un volumen de datos de 57 valores de caudal.
- Los  $Q_{SIM OBS}$  son valores diarios de caudal obtenidos en el archivo de salida del programa .rch correspondientes a la variable  $FLOW\_OUTcms$  del modelo para el cauce principal de la subcuenca número 8, con la posibilidad de obtener un valor de caudal para cada día dentro del periodo 2015-2024.
- Por el hecho de no contar con la posibilidad de generar varias simulaciones para definir el espectro de variación de los valores de salida, se establece una tolerancia de +/-25% para tener en cuenta los posibles intervalos de variación dados por las distintas combinaciones posibles de valores de parámetros y un error aceptable de la simulación respecto al valor real.

Teniendo en cuenta éstas aclaraciones surge la necesidad de convenir un método de comparación que permita analizar los valores de manera semejante. Surgen entonces dos métodos posibles:

1. Comparar los valores en todos los días del periodo, utilizando las alturas relevadas por el SNIH y la ley H-Q5 desarrollada para Pueblo Andino en el ítem 5.2.3. del presente trabajo con la siguiente expresión:

$$Q = 41,98 * (H - (-0,48))^{1,33}$$

2. Comparar los valores solamente en los días aforados.

En principio se planteó utilizar el método 1, el cual genera caudales diarios mediante una ley H-Q5 partiendo de alturas observadas de manera diaria por el SNIH, lo cual trae los siguientes inconvenientes:

- El método de ajuste de la ley tiene implícitos errores de estimación.
- La ley se ajusta para una cantidad limitada de valores aforados, que definen un rango límite de variación. Por fuera de esos límites la curva genera mayores errores en su aproximación.
- Las alturas hidrométricas diarias informadas por el SNIH tienen implícito tanto errores sistemáticos como accidentales.
- La comparación no se realizaría directamente con caudales aforados en campo sino que sería de forma indirecta con caudales inferidos a través de las alturas informadas y la ley utilizada.

- En la serie de alturas hidrométricas se detectaron intervalos en los cuales se infiere que el SNIH decidió completar mediante interpolación lineal entre puntos extremos locales, debido a faltante de datos, pérdida, falta de representatividad o alguna otra razón.
- No se ha realizado hasta la fecha de hoy un análisis de distribución de probabilidades de la ley ajustada que determine la confianza de su utilización.

Todas estas razones justifican que se desestime el primer método explorado y se opte por utilizar el método 2, el cual resulta de comparar los valores de caudal para los 57 días en donde se realizaron aforos. A continuación se presenta un gráfico con los valores obtenidos de la simulación del modelo con la tolerancia previamente mencionada y los valores de caudal aforados.

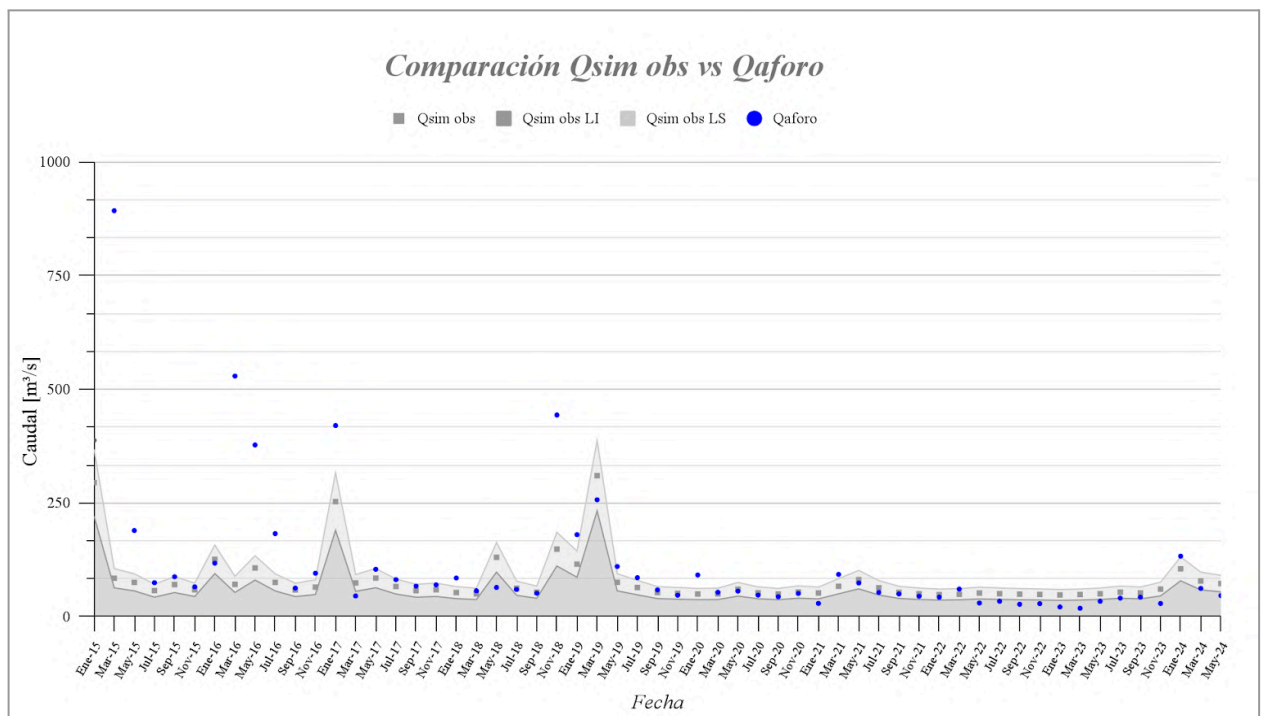


Figura 6.43. Comparación en los días de aforo de los caudales simulados con datos observados vs caudales aforados.

Analizando la Figura 6.43 y los 57 valores comparados se hacen algunas observaciones, las cuales se enuncian a continuación:

- Se observa un caudal recurrente en los valores aforados que podría representar el caudal base del cauce, se estima que puede oscilar entre 50 y 60 m<sup>3</sup>/s.
- A partir del año 2019 se observa que los valores simulados presentan una menor desviación respecto de los aforados, donde las salidas del modelo se ajustan mejor a las condiciones reales del curso.
- Los picos de caudal de los datos aforados no quedan representados por las salidas del modelo en los días correspondientes.

- Comparando de forma puntual únicamente las fechas aforadas sin tener en cuenta una variabilidad temporal, se obtiene de la salida del modelo una cobertura cercana al 50% de los valores aforados.

TOTAL	28
% En umbral	49.12%

Tabla 6.5. Cobertura de caudales aforados - Comparación puntual en fecha relevada.

Por lo que surge la necesidad de explicar a que se deben las diferencias entre los valores de la simulación ( $Q_{SIM OBS}$ ) y las condiciones reales del flujo representadas mediante los valores aforados ( $Q_{AFORO}$ ). En primer medida, se plantea observar cuales son las salidas del software el resto de los días que no coinciden con los días donde se hicieron los aforos, para ello, se presenta un nuevo gráfico en la *Figura 6.44*, mostrando los caudales simulados en todos los días del periodo vs los caudales aforados.

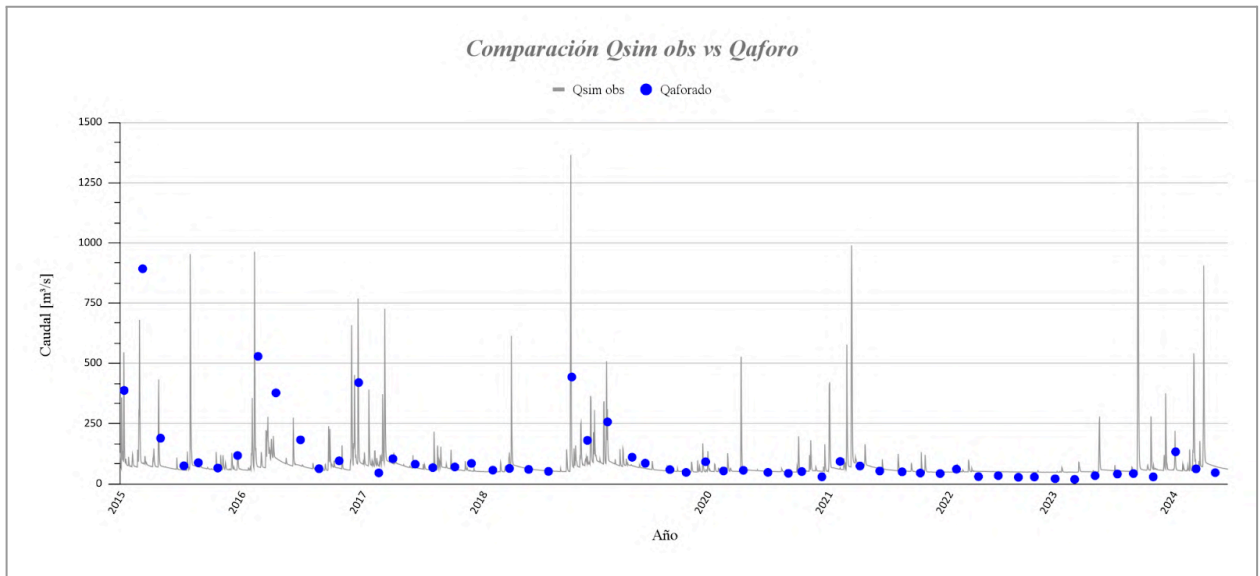


Figura 6.44. Comparación en todo el periodo de los caudales simulados con datos observados vs caudales aforados.

Se pueden ver valores de caudales simulados que en la figura anterior no quedaban representados, debido a que los días en los que se presentan no coinciden con días de aforo. Teniendo presente esto, se obtienen las siguientes conclusiones del análisis comparativo:

- Los valores de caudales pico aforados son reconocidos y representados por las salidas de la simulación con un desfase temporal, se observan caudales pico en un rango de 5 a 15 días previos a los días de aforo, se podría concluir entonces que el tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca simulada es menor que el de la cuenca real.
- Los picos de caudales simulados no necesariamente son representados por los datos aforados por su discontinuidad temporal. Para comprender esto, puede observarse que el día 23/09/2023 (día 265

juliano), la salida del modelo representa un caudal extraordinario, contrastando los valores aforados más cercanos a dicho pico, 08/09/2023 (día 251 juliano) y 09/11/2023 (día 313 juliano).

Entonces, observando los inputs, específicamente las precipitaciones (*Tabla 6.6.*) se puede ver que en el intervalo temporal entre los valores aforados se produjo una lluvia extraordinaria en las estaciones virtuales que aportan a la sección de cierre en estudio, el mismo día que se presenta el pico de caudal en el modelo. Por lo que dicha crecida puede no haber sido aforada ya que los días de aforo el cauce estaba en condiciones normales.

Precipitaciones (PRECTOTCORR) [mm/día]								
Año	Día	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Prom. Diario
2023	249	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2023	250	0.92	0.03	0.22	0.08	0.26	0.08	0.28
2023	251	0.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
2023	252	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2023	253	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
-----								
2023	263	0.06	0.01	0.01	0.0	0.0	0.0	0.01
2023	264	3.77	3.98	56.84	50.0	130.02	50.0	49.23
2023	265	10.15	24.05	61.32	170.7	343.17	170.7	124.91
2023	266	0.0	0.0	0.0	0.02	0.07	0.02	0.02
2023	267	0.0	0.0	0.0	0.02	0.05	0.02	0.01
-----								
2023	311	0.85	1.53	0.38	0.31	0.03	0.31	0.57
2023	312	1.47	0.34	0.31	0.0	0.0	0.0	0.38
2023	313	0.1	0.02	0.01	0.0	0.0	0.0	0.02
2023	314	7.51	5.66	8.69	7.5	10.58	7.5	7.97
2023	315	0.16	0.06	0.22	0.49	0.86	0.49	0.37

*Tabla 6.6. Extracto de precipitaciones informadas por estaciones virtuales de NASA POWER.*

- Los caudales simulados son muy sensibles a las precipitaciones cargadas como INPUT, por lo que las salidas del modelo pueden incurrir en importantes diferencias con el valor aforado si el dato de entrada no es preciso.

- Se debe tener en cuenta que los caudales aforados por el SNIH incluyen también un error asociado al método de medición utilizado, lectura de datos y procesamiento.
- Considerar también que SWAT es un modelo a nivel regional, no es de eventos, por lo cual no es su principal capacidad representar exactamente eventos extraordinarios.
- Comparando de esta forma, teniendo en cuenta el desfase temporal de 5 a 10 días, se logra una cobertura de aproximadamente el 80% de los datos aforados.

<b>TOTAL</b>	45
<b>% En umbral</b>	78.95%

*Tabla 6.7. Cobertura de caudales aforados - Comparación teniendo en cuenta el desfase temporal.*

Se concluye entonces que el modelo actual tiene la capacidad de representar los valores aforados, sin embargo, es indispensable realizar varias simulaciones del mismo como se mencionó en la introducción del ítem 6.2. con el fin de definir el espectro de variación de las salidas, sumado a la necesidad de contar con una mayor cantidad de datos de entrada confiables. Se puede ajustar más parámetros del modelo agrohidrológico, calibrar el tiempo de respuesta de la cuenca y mejorar la cobertura, pero se estaría pasando a analizar más por evento que a nivel regional, para lo cual no es la herramienta específica para ese análisis aunque tenga el potencial para lograrlo.

### 6.2.2. Comparación caudales simulados estimados con aforados en Pueblo Andino.

De igual manera, se procede a observar las salidas del modelo, pero en éste caso en base a inputs generados de manera mensual, como son las entradas climáticas explicadas en el ítem 5.2.1. *Clima*, para las cuales se hizo un promedio de los valores diarios y los caudales de entrada estimados en 5.2.3. *Caudal* mediante el método de estimación de caudales de entrada definido por Romagnoli et al. (2017). Estos caudales de salida mensuales simulados a través datos de entrada mensuales estimados se definen como  $Q_{SIM\ EST}$  y se comparan con los caudales aforados en los meses donde se realizaron aforos, dando como resultado el gráfico que se presenta en la *Figura 6.45*.

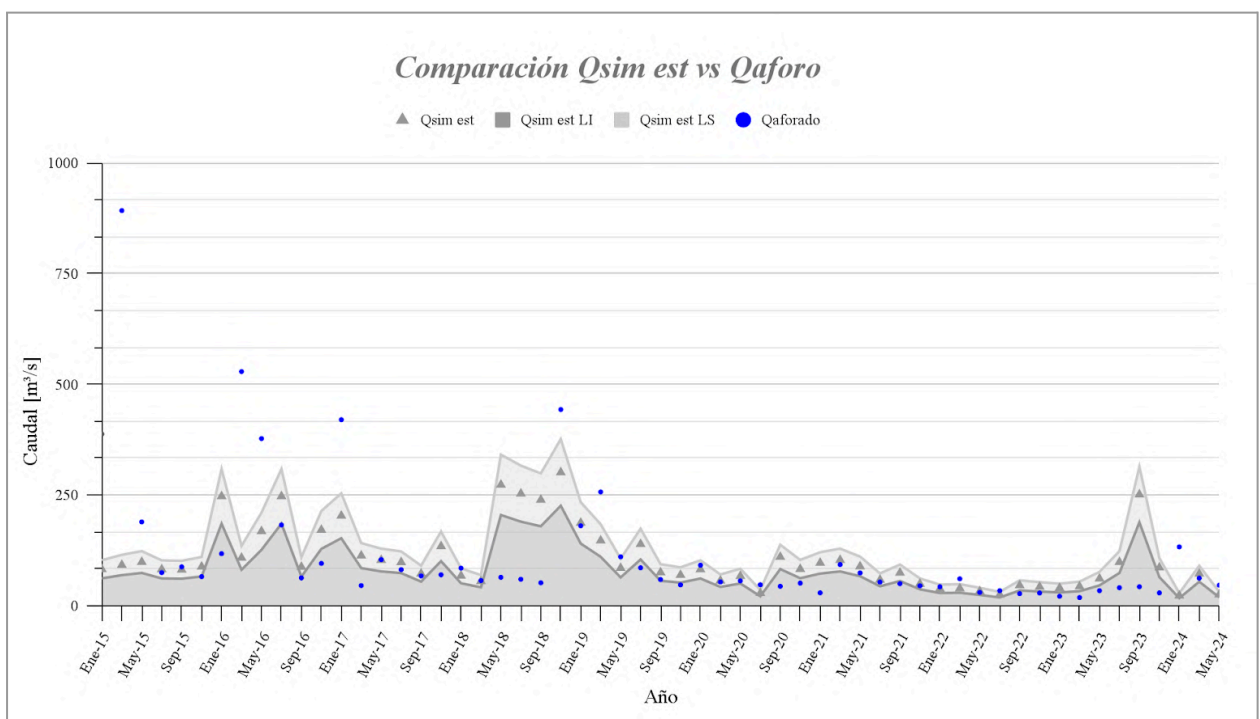


Figura 6.45. Comparación en los días de aforo de los caudales simulados con datos estimados vs caudales aforados.

Hay una importante desviación respecto a los valores aforados, con muy pocos valores aforados dentro del espectro de variación definido.

El porcentaje de cobertura lograda mediante este método es cercano al 32%, comparando de forma puntual.

<b>TOTAL</b>	18
<b>% En umbral</b>	31.58%

Tabla 6.8. Cobertura de caudales aforados - Comparación puntual en fecha relevada.

Esto plantea el interrogante de cuáles son los valores que no quedan representados debido a la discontinuidad temporal de los valores aforados, por lo que se procede a generar la gráfica comparando todos los valores mensuales de las salidas simuladas vs los valores aforados.

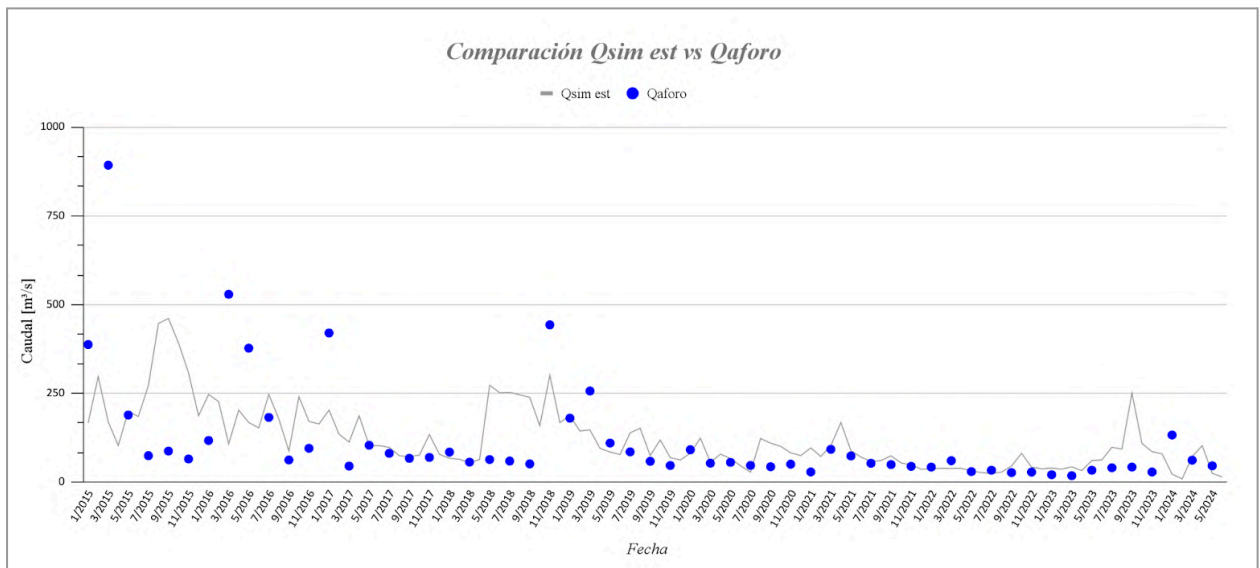


Figura 6.46. Comparación en todo el periodo de los caudales simulados con datos estimados vs caudales aforados.

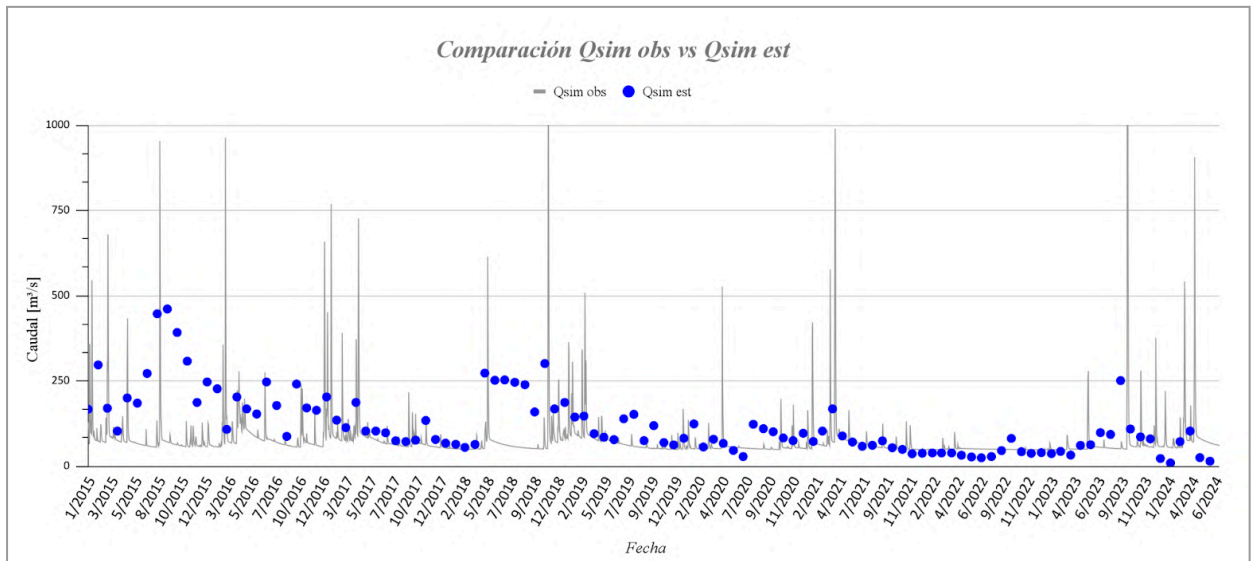
A diferencia de lo observado en 6.2.1. Comparación caudales simulados observados con aforados en Pueblo Andino, en éste caso, los caudales simulados mensuales no representan los picos de caudal que suceden por crecidas que duran en el orden varios días por su característica temporal, los cuales se podrían interpretar como valores medios de lo que sucede de manera diaria en los meses del período. Lo que demuestra el salto de calidad que significa contar con entradas y salidas diarias. La cobertura obtenida es cercana al 55%.

<b>TOTAL</b>	31
<b>% En umbral</b>	54.39%

Tabla 6.9. Cobertura de caudales aforados - Comparación teniendo en cuenta el desfase temporal.

### 6.2.3. Comparación simulados observados con simulados estimados

A continuación se presenta la *Figura 6.47.* que muestra el gráfico comparativo entre las salidas de manera diaria en base a datos de entrada observados y las salidas mensuales en base a datos de entrada estimados.



*Figura 6.47. Comparación en todo el periodo de los caudales simulados con datos observados vs estimados.*

Como era esperado, se puede ver como los valores de los caudales mensuales ( $Q_{SIM\ EST}$ ) tienden a ser valores medios cuando se los representa vs datos diarios, en este gráfico se evidencia la pérdida de información asociada a la carga de datos mensuales respecto a los datos diarios, más allá de las diferencias observadas en el gráfico que se deben a los diferentes inputs cargados en cada simulación.

Para terminar el análisis se presenta en la *Figura 6.48.* la comparación entre caudales simulados y estimados de forma mensual. Esto permite observar otras diferencias, teniendo en cuenta que los  $Q_{SIM\ OBS}$  son un promedio de valores diarios obtenidos:

- Mediante el método de Romagnoli et al. (2017) se sobrestiman los caudales, pero, a nivel mensual se logra una mejor representación de eventos extraordinarios, esto es así principalmente porque el input de entrada es una "copia" del caudal de salida observado.
- Ambos métodos parecen seguir la misma tendencia, esto lo demuestra un  $R^2$  de 0,98.
- Tomando  $Q_{SIM\ OBS}$  como de confianza, el error relativo obtenido al usar el método con el cual se obtiene  $Q_{SIM\ EST}$  es RMSE de 95,32 m³/s.

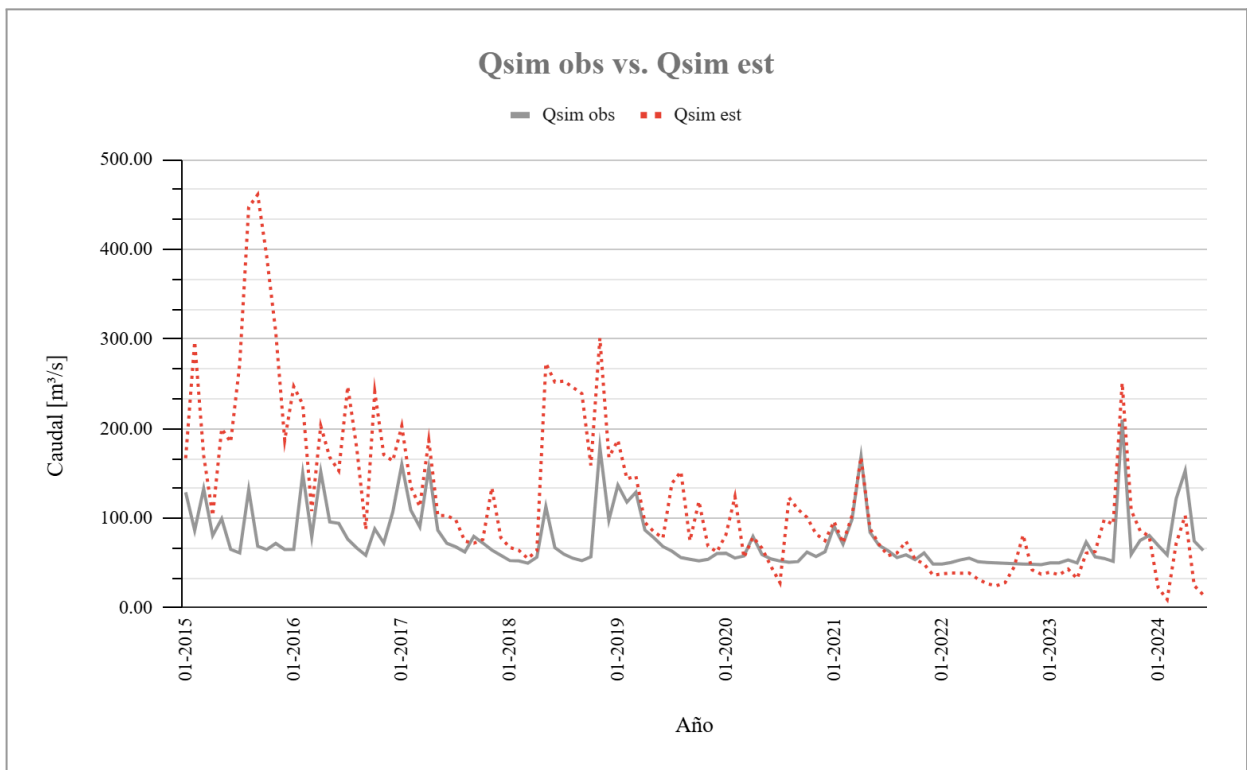


Figura 6.48. Comparación de caudales simulados y estimados de forma mensual.

## **7. Conclusiones**

### **7.1. Conclusiones del proyecto**

La Cuenca Baja del Río Carcarañá presenta problemáticas que involucran diferentes niveles de gestión y jurisdicción, como el uso de suelos y su regulación, la delimitación de áreas inundables, la generación de contaminantes, la creciente erosión de suelos, la reducción de productividad agrícola, etc. Esto provoca que sea una cuenca muy compleja para su estudio y medición, existiendo pocas estaciones de medición pluviométrica y/o hidrométrica, y las series de datos de aquellas existentes suelen presentar intervalos de tiempo sin información, producto de falta de mantenimiento, roturas o hurtos. Esta escasez de información demora toda investigación que resulte beneficiosa para la cuenca, debiendo llevar a cabo arduas y extensas salidas de campo para contar con dicha información. Además, dichas problemáticas son de carácter técnico-sociales, por lo que se destaca la importancia de una resolución integral a nivel multidisciplinario, desde Ingenieros Civiles/Agrónomos, hasta sociólogos y politólogos.

El análisis realizado a lo largo de todo el proyecto pone de manifiesto la relevancia de complementar las medidas estructurales con enfoques no estructurales para alcanzar una gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos. Según nuestro criterio las medidas no estructurales representan un enfoque estratégico que prioriza la prevención, la sostenibilidad y la reducción de costos en el largo plazo. Dichas medidas no estructurales deben ser articuladas dentro de una planificación definida por los responsables de la gestión a nivel regional.

Se evidencia una falta de comunicación y trabajo en conjunto de los distintos actores tanto del Orden Gubernamental Institucional (OGI) como de la Sociedad Civil (SC) para abordar estas problemáticas que afectan a toda la población. Del lado de los OGI es recomendable que asuman un rol más protagónico, principalmente desde el punto de vista técnico, para generar políticas públicas enfocadas a la sostenibilidad ambiental y social, y llevar a cabo una administración a nivel regional de la cuenca. Por ejemplo se podría estudiar una regulación de las actividades agrícolas-ganadera, industriales y urbanas, preservación de áreas críticas, promoción de actividades sustentables, involucrando a los actores de la SC en el diseño e implementación de las mismas.

En cuanto a la toma de decisiones, como ya hemos visto a lo largo de las respuestas vinculadas a los actores claves, se generan principalmente por parte del sector público relacionado a la política, y se deja de lado la opinión del sector público relacionado a la parte técnica. También, es importante que, al tratarse de una cuenca interjurisdiccional, exista una relación estrecha con los actores gubernamentales de la provincia de Córdoba, tanto para la realización de mediciones, evitar las derivaciones de agua sobre la provincia de Santa Fe y alertar acerca de crecidas peligrosas para la misma, ya que los tiempos de concentración son muy bajos. Como responsabilidad del sector público, se espera también, que informar correctamente a la

sociedad civil de las problemáticas globales es importante, para que de este modo se comprenda la existencia de las mismas, que contemplan a todos los actores que se encuentran en la región de la cuenca, y de esta manera resolver los problemas puntuales o localizados siguiendo el objetivo primordial. Y como ya sabemos, la resolución de estos problemas con magnitudes significativas implican la necesidad de un modelo que contemple todas las variables.

Con los resultados obtenidos del modelo y su posterior análisis, se evidencia una buena representación de la realidad por parte del software SWAT, coincidiendo caudales picos con periodos de inundaciones, pero con la necesidad de una calibración de nuevos parámetros para que en la salida de la simulación se ajusten las magnitudes de estos valores extremos y los tiempos de concentración. Además, la utilización de datos diarios para la simulación se correlaciona mejor con la realidad, ya que los hidrogramas de salida cuando se trabaja con valores mensuales tienden a aplanar la curva.

En términos de erosión, los valores que surgen del análisis resultan coherentes con distintas investigaciones realizadas sobre el sur de la provincia y los periodos con importante producción de sedimentos coinciden con importantes periodos lluviosos en la zona.

Finalmente, al evaluar el rendimiento del cultivo de trigo, no se observa una buena representación de la realidad, tendiendo a valores por debajo de los promedios regionales, debiendo realizar un mayor ajuste para la evaluación de la producción de cultivos. Sin embargo, representa adecuadamente ciertos periodos, como la caída de los rendimientos en 2008.

Se logró validar el modelo SWAT para la cuenca del Carcarañá con un ajuste aceptable a la realidad entre 1998-2015 y 2015-2024. Esto permitió comprender y caracterizar la problemática hídrica de la región y plantear bases para futuras intervenciones en la gestión de recursos hídricos de la misma.

Se destaca la necesidad de trabajar con un modelo que incluya la agricultura dentro del estudio hidrológico, por la relevancia que tiene como actividad productiva en la región y su influencia directa sobre la dinámica hídrica a nivel de cuenca. Entonces, se concluye que la posibilidad de implementar un modelo agrohidrológico especializado como una herramienta para comprender y gestionar los recursos hídricos de manera integral resultaría de gran utilidad en la resolución de problemas que serían muy complejos de entender sin dicha herramienta debido a la complejidad de los procesos y la cantidad de variables intervinientes en el análisis.

Se puede analizar la posibilidad de establecer un sistema de monitoreo comunitario, haciendo uso del potencial de SWAT, no solo para evaluar el impacto de cada problemática sino que también y principalmente para dar a entender la existencia de las mismas, la responsabilidad de cada una de las partes mejorando la educación, sensibilidad y comprensión al respecto, mejorar el acceso a la información (por ejemplo accediendo desde una plataforma web con distintos niveles de acceso y presentación de la

información según la capacidad técnica del usuario) y generar diferentes niveles de alerta según el monitoreo continuo de una serie de variables críticas.

## **7.2. Reflexiones sobre la experiencia grupal**

La elaboración de este proyecto de investigación resultó en una valiosa experiencia de aprendizaje individual y grupal, siendo tanto un desafío técnico, académico y social. Como futuros profesionales de la Ingeniería Civil y con orientación actualmente a la rama estructural de la profesión, nos enfrentamos a tareas, flujos de trabajo y dinámicas a las cuales no estábamos acostumbrados y que nos permitió ampliar nuestras habilidades y perspectivas.

La experiencia de realizar un proyecto de investigación sobre la validación del modelo agrohidrológico SWAT nos llevó a comprender las problemáticas reales que afectan a la cuenca del Río Carcarañá, lo cual implicó no solo conocimientos técnicos adquiridos durante el desarrollo de la carrera sino que también desarrollar nuevas capacidades, como la recolección y análisis de gran cantidad de datos primarios y secundarios, la comprensión de herramientas avanzadas de simulación y sus complementos, y la interpretación y comparación de resultados.

Otro de los aspectos enriquecedores fue la interacción con organismos públicos y actores vinculados a la gestión de los recursos hídricos. Comprendiendo el funcionamiento y organización de estas instituciones y su importancia en la implementación de políticas públicas y resolución de problemáticas complejas.

Identificamos también la importancia de la colaboración interdisciplinaria para el abordaje de este tipo de problemáticas y el papel fundamental de investigadores, como por ejemplo del CONICET, académicos y otros especialistas quienes aportan conocimientos fundamentales para el avance científico y la planificación estratégica.

Todo esto nos brindó una mejor comprensión de la importancia entre los sectores académicos, públicos y privados para abordar problemáticas socioambientales complejas.

## 8. Bibliografía

Diaz Losada, J. M., García, C. M., Herrero, H., Barchiesi, G. M., Romagnoli, M., Portapila, M., López, F., Castelló, E., Cosavella, A. y Brarda, J. P. (2015). *Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá*. Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2, 59-72.

Basile, P., Riccardi, G., Zimmermann, E., Stenta, H., Bussi, P. y Mangiamelli, P. (2013). *Aprovechamiento del río Carcarañá-Tercero como vía fluvial navegable. Parte I: Diseño del sistema de transporte y de la vía fluvial*. Revista Cuadernos del CURIHAM, 19, 51-69.

Martín Romagnoli et al. (2017). *Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina*. Revista Science of The Total Environment, 596-597 (2017) 437–450.

Stenta, H., Riccardi, G. y Basile, P. (2015). *Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tercero-Carcarañá*. Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.

Basile, P. (2013). *Aprovechamiento del sistema hidrográfico Carcarañá - Tercero como Vía Fluvial Navegable*. Seminario CURIHAM, 2013.

Santiago Javier Martínez. *Cuenca del Río Carcarañá*. Archivo General de la Nación.

Polare, M. H. (2019). *Comportamiento del sistema acuífero en la cuenca inferior del río Carcarañá. Provincias de Santa Fe y Córdoba, República Argentina*. Tesis Magistral, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.

Nieva, E. (2022). *Carcarañá, el río "rebelde" que invita a redescubrir una historia milenaria*. Aire Digital. Fuente: <http://www.airedesantafe.com.ar/>.

Lovino, M. A., Müller, G.V., Sgroi, L.C. (2020). *¿Cómo ha cambiado la precipitación en la provincia de Santa Fe?*. RIA. Revista de investigación. agropecuaria vol.46 no.2. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, mayo de 2020.

GeoINTA.(2010). *Precipitación media mensual*. Visor GeoINTA. Disponible en <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>.

Köppen-Geiger Explorer. (1991-2020). *Climate zones*. Köppen-Geiger Explorer. Disponible en <https://koppen.earth/>.

Arnfield, J.A. (2024). *Köppen-Geiger-Pohl climate classification*. Britannica. Última revisión: 13-09-24. Fuente: <https://www.britannica.com/biography/Wladimir-Peter-Koppen>.

Bianchi, A. R. y Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*. Ediciones INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

*Un lote con monocultivo de soja pierde 50% más de agua por escurrimiento al año*. (2021). AgriBio. <https://www.agribio.com.ar/>.

Servicio Meteorológico Nacional (2020). *Valores medios de temperatura y precipitación*. Recuperado el 14 de septiembre de 2024 de <https://www.smn.gob.ar/estadisticas>.

Gobierno de Santa Fe. (2008). *Censo Nacional Agropecuario 2008*. Disponible en <https://www.santafe.gov.ar/>.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2016). *Estimaciones agrícolas*. Serie de estadística agrícola por cultivo, campaña, provincia y departamento de la República Argentina. Última actualización: 06-09-2024. Fuente: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>.

Infraestructura de Datos Espaciales. (2011-2015). *Visualizador 2.3*. Disponible en <https://www.santafe.gov.ar/>.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2002). *Censo Nacional Agropecuario 2002*. Disponible en <https://sitioanterior.indec.gob.ar/>.

Gobierno de Santa Fe. (2024). *Censo Nacional Agropecuario 2008*. Provincia de Santa Fe. Mapas dinámicos. Disponible en <https://www.santafe.gov.ar/>.

*Vecinos preocupados por la creciente del Carcarañá*. (2019). Sin Mordaza. <https://www.sinmordaza.com/>.

*El río Carcarañá crece y amenaza varias localidades del sur provincial*. (2015). El Litoral. <https://www.ellitoral.com/>.

*Los detalles de la clausura de una planta de alimentos balanceados para animales que contamina 8 pueblos y el río Carcarañá, en Santa Fe.* (2023). Infobae. <https://www.infobae.com/>.

*La fuerte crecida del río Carcarañá muestra sus efectos más temidos.* (2015). La Capital. <https://www.lacapital.com.ar/>.

*El Carcarañá sobrepasó la ruta 9, que seguirá cortada el fin de semana.* (2015). Uno Santa Fe. <https://www.unosantafe.com.ar/>.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) project*. Disponible en <https://power.larc.nasa.gov/>.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). *Data Access Viewer (DAV)*. NASA POWER Project. Disponible en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Infraestructura de Datos Espaciales de Santa Fe (IDESF). *Datasets*. Disponible en <https://datos.santafe.gob.ar/dataset>.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2010-2013). *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)*. Disponible en <https://climatedataguide.ucar.edu/>.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation versión 2009*. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>.

Díaz Lozada, J. M. (2019). *Avances en la cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica del flujo en el sistema fluvial del Río Carcarañá utilizando ADCP*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Bertoni, J.C., Ganancias, F. (2010). *Comportamiento hidrológico y criterios del diseño de obras hídricas en sistemas climáticos cambiantes: reflexiones y análisis de casos*. En: Paoli, C.U., Malinow, G.V. (Eds.), *Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, pp. 7–22.

Guevara Ochoa, C. (2017). *Relleno de series de precipitación diaria para largos períodos de tiempo en zonas de llanura. Caso de estudio cuenca superior del arroyo azul*. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. GEOACTA 42(1) - ISSN 1852-7744.

Comité de Cuencas Arroyo Totoras, Canales Salto Grande y Serodino. Disponible en <https://comitearroyototoras.com.ar/>.

Byrd, R H and P Lu and J. Nocedal. (1995). *A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization*. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing 16 (5): 1190-1208.

Zhu, C and R H Byrd and J Nocedal. (1997). *L-BFGS-B: Algorithm 778: L-BFGS-B, FORTRAN routines for large scale bound constrained optimization*. ACM Transactions on Mathematical Software 23 (4): 550-560.

Santa Fe (2000). *Ley N.º 11.730, Ley de Gestión del Riesgo Hídrico y Uso del Suelo*. Sancionada el 6 de marzo del año 2000. Boletín Oficial de la Provincia de Santa Fe, publicado el 25 de abril de 2000.

Infraestructura de Datos Espaciales de Santa Fe (IDESF). *Implementación de la ley provincial N° 11.730. Zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables en sistemas hídricos de la provincia de Santa Fe*. Cartas temáticas por localidad de la provincia de Santa Fe.

Díaz Lozada, J. M. (2019). *Avances en la cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica del flujo en el sistema fluvial del Río Carcarañá utilizando ADCP*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Gerardo A. Riccardi, H. R. Stenta y J. P. Rentería. *Capítulo I: Modelación de Escurrimiento Superficial*. En Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura 1ª Edición – Rosario: UNR Editora, ISBN 978-950-673-691-0, pp. 21-38.

SWAT (2012). *SWAT Output data: Primary output files*.

Disponible en [https://swat.tamu.edu/media/69395/ch32\\_output.pdf](https://swat.tamu.edu/media/69395/ch32_output.pdf).

Neitsch, S.L. (2005). *Herramienta de evaluación de suelo y agua. Documentación teórica*. Versión 2005.

Disponible en <https://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>.

Uribe, Natalia. (2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario*. Versión SWAT 2005.

Disponible en <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>.

Gaitan et al. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Research Gate. Diciembre 2017.

## 9. Anexo

### 9.1. Recopilación de datos de campo secundarios

Localidad	Problemática	Ref.	Fecha	¿Quién reclama?	¿A quién reclama?	¿Por qué reclama?
Aldao	Inundación	1	15/03/2015	Informativo		
	Sequía	2	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
		3	06/04/2023	Informativo		
Arequito	Inundación	4	14/05/2015	Presidente comunal (PS) y productores agropecuarios	Ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de Santa Fe (PS)	Ejecución de obras hidráulicas
		5	17/08/2015	Secretario de Agricultura de Santa Fe (PS)	Productores agropecuarios	Escasa variabilidad de cultivos, se siembra únicamente soja
		6	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema
	Sequía	7	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		

Armstrong	Inundación	8	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema	
		9	06/01/2016	Habitantes y presidente comunal (PS)	Gobernador de Santa Fe (PS)	Ingreso de agua a viviendas, anegamiento calles y rutas	
		10	16/01/2017	Conductores vehiculares	Vialidad Nacional	Anegamiento Ruta Nacional 1V09	
		11	18/08/2019	Conductores vehiculares	Vialidad Nacional	Anegamiento Ruta Nacional 1V09	
	Sequía	12	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			
		13	25/06/2020	Productores agropecuarios	-	Pérdidas monetarias/Mala campaña	
Arteaga	Inundación	14	12/03/2015	Conductores vehiculares	Vialidad Nacional	Anegamiento Ruta Provincial 15	
		15	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema	
	Contaminación	16	2019-2021	Habitantes	Ministerio de Ambiente y Cambio Climático de Santa Fe	Lentitud con la cual se trato	
	Sequía	17	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			
Berabevú	Inundación	18	21/02/2016	Productores agropecuarios y conductores vehiculares	-	Anegamiento Ruta Provincial 93 e inundación de campos	
	Sequía	19	17/10/2022	Diputada de Santa Fe (PS)	Gobernador de Santa Fe (PJ)	Declarar estado de emergencia agropecuaria debido a la sequía	
Berretta	-						
Bustinza	Inundación	20	27/02/2016	Presidente comunal (PJ)	Gobernador de Santa Fe (PS)	Ejecución de entubado dentro del ejido urbano	
Cafferata	Inundación	21	26/02/2020	Senador de Santa Fe (UCR)	Productores agropecuarios	Anegamiento en Ruta Provincial 15 y Presencia de canal clandestino	

Cañada de Gómez	Inundación	22	24/11/2000	Habitantes	-	Ejecución de obras hidráulicas	
		23	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema	
	Sequía	24	20/11/2022	Informativo			
		25	30/03/2023	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			
Cañada del Ucle	Inundación	26	17/07/2019	Habitantes	Productor agropecuario	Canales clandestinos que inundan campos linderos	
	Sequía	27	20/10/2023	Informativo			
Carcarañá	Inundación	28	05/03/2014	Informativo			
	Inundación	29	12/03/2015	Informativo			
	Sequía	30	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			
	Sequía	31	27/07/2023	Informativo			
Carrizales	-						
Casilda	Inundación	32	17/08/2015	Secretario de Agricultura provincial (PS)	Productores agropecuarios	Escasa variabilidad de cultivos, se siembra únicamente soja	
		33	14/05/2015	Presidente comunal (UCR) y productores agropecuarios	Ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de Santa Fe (PS)	Ejecución de obras hidráulicas	
	Sequía	34	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			
Chañar Ladeado	Inundación	35	21/02/2016	Productores agropecuarios y conductores vehiculares	-	Anegamiento Ruta Provincial 93 e inundación de campos	
Colonia El Carmén	-						
Correa	Sequía	36	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía			

Godekén	Inundación	37	21/02/2016	Habitantes	-	Evacuación producto de ingreso de agua a las viviendas
La Chispa	Inundación	38	17/03/2014	Habitantes	Productores agropecuarios	Canales clandestinos en campos
		39	24/07/2014	Senador provincial (UCR)	Gobernador de Santa Fe (PS)	Demora en ejecución de canal La Chispa-Godeken
Los Molinos	Inundación	40	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema
		41	17/08/2015	Secretario de Agricultura provincial (PS)	Productores agropecuarios	Escasa variabilidad de cultivos, se siembra únicamente soja
		42	14/05/2015	Presidente comunal (PS) y productores agropecuarios	Ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medio Ambiente de Santa Fe (FPCyS)	Ejecución de obras hidráulicas
		43	30/03/2017	Productores agropecuarios	Secretaría de Recursos Hídricos de Santa Fe (PS)	Pedido de una solución integral, ejecución de canal aliviador
	Sequía	44	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Los Nogales	-					
Los Quirquinchos	-					
Lucio V. López	Sequía	45	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Luis Palacios	-					

Oliveros	Inundación	46	21/08/2015	Presidente comunal (PJ)	Ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medioambiente (PS)	Ejecución de obra que perjudica a Oliveros
	Inundación	47	21/08/2015	Ministro de Aguas, Servicios Públicos y Medioambiente (PS)	Presidente comunal (PJ)	Oponerse a obras por intereses propios
	Contaminación	48	09/12/2018	Habitantes	Gobernador de Santa Fe (PS)	Saneamiento y obras en el Río Carcarañá
	Sequía	49	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Pueblo Andino	Inundación	50	15/03/2015	Informativo		
		51	20/08/2015	Secretario de Coordinación de la FAA	Gobernador de Santa Fe (PS)	Sus dichos sobre canales clandestinos y falta de obras
		52	03/02/2019	Habitantes, Jueza de faltas y Asesor de asuntos hídricos	Secretario de Recursos Hídricos de Santa Fe (PS)	Efectos de la obra del Canal Aliviador Arequito y crecida del Río
	Sequía	53	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Puerto Gaboto	Sequía	54	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Salto Grande	-					
San Estanislao	-					
San Jerónimo Sud	Inundación	55	13/03/2021	Productores de la región	Autoridades provinciales (PS)	Culminación de obras
	Sequía	56	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
San José de la Esquina	Inundación	57	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales	Poca relevancia que se le dió al tema
		58	17/08/2015	Secretario de Agricultura provincial (PS)	Productores agropecuarios	Escasa variabilidad de cultivos, se siembra únicamente soja
	Sequía	59	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		

San Ricardo	-					
Serodino	Sequía	60	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Timbues	Inundación	61	11/03/2015	Informativo		
		62	30/10/2012	Habitantes	Autoridades	Falta de atención
		63	19/02/2016	Habitantes	Presidente comunal y Secretario de seguridad de la comuna (PJ)	Agua en sus hogares, no le dan relevancia
	Sequía	64	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		
Villa Eloisa	Inundación	65	24/03/2015	Agricultores y ganaderos locales	Autoridades provinciales (PS)	Poca relevancia que se le dió al tema
	Sequía	66	24/07/2018	Declaración de emergencia agropecuaria por sequía		

Tabla 9.1. Recopilación de datos de campo secundarios.

Ref.	Link Noticia
1	<a href="http://conclusion.com.ar/la-region/sigue-cortado-el-puente-entre-andino-y-aldao/03/2015/">conclusion.com.ar/la-region/sigue-cortado-el-puente-entre-andino-y-aldao/03/2015/</a>
2	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
3	<a href="http://11noticias.com/noticias/Regionales/Productor-agropecuario-de-Aldao-recibio-a-TN-para-hablar-sobre-la-sequia--vendo-repuestos-para-sobrevivir_26097.html">11noticias.com/noticias/Regionales/Productor-agropecuario-de-Aldao-recibio-a-TN-para-hablar-sobre-la-sequia--vendo-repuestos-para-sobrevivir_26097.html</a>
4	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/piden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/piden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html</a>
5	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html</a>
6	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
7	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>

8	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
9	<a href="http://lacapital.com.ar/las-lluvias-inundaron-varias-localidades-del-sur-la-provincia-santa-fe-n499476.html">lacapital.com.ar/las-lluvias-inundaron-varias-localidades-del-sur-la-provincia-santa-fe-n499476.html</a>
10	<a href="http://clarin.com/sociedad/rutas-34-cortadas-inundaciones-sur-santa-fe_0_HJXdINqLg.html">clarin.com/sociedad/rutas-34-cortadas-inundaciones-sur-santa-fe_0_HJXdINqLg.html</a>
11	<a href="http://pergaminoverdad.com.ar/archivos/32103">pergaminoverdad.com.ar/archivos/32103</a>
12	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
13	<a href="http://lanacion.com.ar/economia/sequia-en-santa-fe-nid157185/">lanacion.com.ar/economia/sequia-en-santa-fe-nid157185/</a>
14	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/el-rio-carcarana-crece-y-siguen-los-problemas-transito-y-areas-inundadas-n2070170.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/el-rio-carcarana-crece-y-siguen-los-problemas-transito-y-areas-inundadas-n2070170.html</a>
15	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
16	<a href="http://surl.li/ysjldz">surl.li/ysjldz</a>
17	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
18	<a href="http://rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9">rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9</a>
19	<a href="http://puntobiz.com.ar/agro/trigo-clara-garcia-pidio-la-emergencia-agropecuaria-por-la-sequia-202210179270">puntobiz.com.ar/agro/trigo-clara-garcia-pidio-la-emergencia-agropecuaria-por-la-sequia-202210179270</a>
20	<a href="http://lasrosasdigital.com.ar/contenido/6908/el-rio-carcarana-complico-otra-vez-a-los-pueblos-comprendidos-en-su-cuenca">lasrosasdigital.com.ar/contenido/6908/el-rio-carcarana-complico-otra-vez-a-los-pueblos-comprendidos-en-su-cuenca</a>
21	<a href="http://leguas.com.ar/regionales/cafferata-enrico-denuncio-canal-clandestino/">leguas.com.ar/regionales/cafferata-enrico-denuncio-canal-clandestino/</a>
22	<a href="http://clarin.com/sociedad/temporal-canada-gomez-muertos-4000-evacuados_0_BJQg6vteCKe.html?srsIid=AfmBOoplXkKE8MY6so6xtyLERNly0J5CP41ONeXluk5dXbECXI06iPVB">clarin.com/sociedad/temporal-canada-gomez-muertos-4000-evacuados_0_BJQg6vteCKe.html?srsIid=AfmBOoplXkKE8MY6so6xtyLERNly0J5CP41ONeXluk5dXbECXI06iPVB</a>
23	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
24	<a href="http://rosario3.com/ecos365/noticias/Canada-de-Gomez-un-caso-emblematico-de-la-sequia-que-golpea-al-campo-20221120-0003.html">rosario3.com/ecos365/noticias/Canada-de-Gomez-un-caso-emblematico-de-la-sequia-que-golpea-al-campo-20221120-0003.html</a>
25	<a href="http://santafe.gob.ar/noticias/noticia/277666/">santafe.gob.ar/noticias/noticia/277666/</a>
26	<a href="http://conclusion.com.ar/la-region/denuncian-que-obras-de-un-campo-santafesino-provocan-inundaciones-a-vecinos/07/2019/">conclusion.com.ar/la-region/denuncian-que-obras-de-un-campo-santafesino-provocan-inundaciones-a-vecinos/07/2019/</a>

27	<a href="http://lanacion.com.ar/economia/campo/hay-chances-el-90-de-la-principal-zona-agricola-esta-en-sequia-y-se-espera-que-no-falle-un-nid20102023/">lanacion.com.ar/economia/campo/hay-chances-el-90-de-la-principal-zona-agricola-esta-en-sequia-y-se-espera-que-no-falle-un-nid20102023/</a>
28	<a href="http://lacapital.com.ar/el-rio-carcarana-crecio-y-la-ruta-9-ya-llego-tocar-la-base-del-puente-n442753.html">lacapital.com.ar/el-rio-carcarana-crecio-y-la-ruta-9-ya-llego-tocar-la-base-del-puente-n442753.html</a>
29	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/el-rio-carcarana-crece-y-siguen-los-problemas-transito-y-areas-inundadas-n2070170.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/el-rio-carcarana-crece-y-siguen-los-problemas-transito-y-areas-inundadas-n2070170.html</a>
30	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
31	<a href="http://lanacion.com.ar/economia/campo/en-un-ano-normal-10-ahora-ahora-uno-revelo-el-impacto-de-la-sequia-y-sorprendio-a-todos-nid08052023/">lanacion.com.ar/economia/campo/en-un-ano-normal-10-ahora-ahora-uno-revelo-el-impacto-de-la-sequia-y-sorprendio-a-todos-nid08052023/</a>
32	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html</a>
33	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impresapiden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html">lacapital.com.ar/edicion-impresapiden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html</a>
34	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
35	<a href="http://rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9">rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9</a>
36	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
37	<a href="http://rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9">rosarioplus.com/actualidad/seguridad/campos-de-chanar-ladeado-fuertemente-afectados-por-el-temporal_a5f4c01ea91ef36023d8cb0d9</a>
38	<a href="http://lacapital.com.ar/critica-situacion-la-chispa-las-copiosas-lluvias-que-podrian-anegar-el-pueblo-n442348.html">lacapital.com.ar/critica-situacion-la-chispa-las-copiosas-lluvias-que-podrian-anegar-el-pueblo-n442348.html</a>
39	<a href="http://venado24.com.ar/regionales/c103-politica/enrico-si-no-hay-acuerdo-el-canal-la-chispa-godeken-se-hara-por-decreto-de-necesidad-y-urgencia/">venado24.com.ar/regionales/c103-politica/enrico-si-no-hay-acuerdo-el-canal-la-chispa-godeken-se-hara-por-decreto-de-necesidad-y-urgencia/</a>
40	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impresavilla-eloisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impresavilla-eloisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
41	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html</a>
42	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impresapiden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html">lacapital.com.ar/edicion-impresapiden-obras-la-cuenca-del-arroyo-candelaria-evitar-inundaciones-n643432.html</a>
43	<a href="http://airesantafe.com.ar/inundaciones-productores-piden-la-provincia-una-solucion-integral-n33932">airesantafe.com.ar/inundaciones-productores-piden-la-provincia-una-solucion-integral-n33932</a>
44	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
45	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
46	<a href="http://elciudadanoweb.com/oliveros-resiste-obra-provincial/">elciudadanoweb.com/oliveros-resiste-obra-provincial/</a>

47	<a href="http://elciudadanoweb.com/oliveros-resiste-obra-provincial/">elciudadanoweb.com/oliveros-resiste-obra-provincial/</a>
48	<a href="http://infomasnoticias.com/index/2018/11/09/oliveros-avanza-una-demanda-colectiva-por-el-dano-ambiental-al-rio-carcarana/">infomasnoticias.com/index/2018/11/09/oliveros-avanza-una-demanda-colectiva-por-el-dano-ambiental-al-rio-carcarana/</a>
49	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
50	<a href="http://conclusion.com.ar/la-region/sigue-cortado-el-puente-entre-andino-y-aldao/03/2015/">conclusion.com.ar/la-region/sigue-cortado-el-puente-entre-andino-y-aldao/03/2015/</a>
51	<a href="http://infocampo.com.ar/desde-faa-cruzar-on-a-bonfatti-por-las-inundaciones/">infocampo.com.ar/desde-faa-cruzar-on-a-bonfatti-por-las-inundaciones/</a>
52	<a href="http://sinmordaza.com/noticia/23107-vecinos-preocupados-por-la-creciente-del-carcarana.html">sinmordaza.com/noticia/23107-vecinos-preocupados-por-la-creciente-del-carcarana.html</a>
53	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
54	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
55	<a href="http://lanacion.com.ar/economia/campo/en-el-sur-de-santa-fe-alertan-que-hay-600000-hectareas-con-anegamientos-nid13042021/">lanacion.com.ar/economia/campo/en-el-sur-de-santa-fe-alertan-que-hay-600000-hectareas-con-anegamientos-nid13042021/</a>
56	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
57	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
58	<a href="http://unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html">unosantafe.com.ar/santa-fe/por-las-inundaciones-se-perdieron-100-mil-hectareas-cultivo-el-sur-santa-fe-n2065824.html</a>
59	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
60	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
61	<a href="http://conclusion.com.ar/la-region/crecida-del-carcarana-afecta-la-region/03/2015/">conclusion.com.ar/la-region/crecida-del-carcarana-afecta-la-region/03/2015/</a>
62	<a href="http://lacapital.com.ar/vecinos-timbues-afectados-el-temporal-mantienen-el-corte-la-ruta-nacional-11-n366297.html#fbk-comments-link">lacapital.com.ar/vecinos-timbues-afectados-el-temporal-mantienen-el-corte-la-ruta-nacional-11-n366297.html#fbk-comments-link</a>
63	<a href="http://laizquierdadiario.com/Vecinos-de-Timbues-cortan-Ruta-11-por-destrozos-del-temporal-y-denuncian-amenazas-de-represion">laizquierdadiario.com/Vecinos-de-Timbues-cortan-Ruta-11-por-destrozos-del-temporal-y-denuncian-amenazas-de-represion</a>
64	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>
65	<a href="http://lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html">lacapital.com.ar/edicion-impres/villa-el-loisa-reunion-productores-afectados-el-carcarana-n639770.html</a>
66	<a href="http://noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/">noticiasagropecuarias.com/2018/07/24/declaran-la-emergencia-agropecuaria-por-sequia-en-chaco-santa-fe-y-cordoba/</a>

Tabla 9.2. Links a las Noticias.

## 9.2. Entrevistas con actores claves

### 9.2.1. Ing. Roberto Porta - Consultar Ingeniería - Candelaria Integrada Asociación Civil (09/10/2024)

1. ¿Cómo se conforma la Asociación Civil Candelaria?

Es una asociación civil de productores de la zona, con objetivos de planificación territorial, disminuir los riesgos de inundaciones en periodos húmedos, y también prevenir los impactos de escenarios secos o semi secos.

2. ¿Esta asociación civil, es la continuación del Comité de Cuenca del Candelaria?

En esta zona no funciona ningún comité de cuenca, y por ello Candelaria Integrada Asociación Civil amplió sus objetivos a la Planificación Hídrica Regional.

3. ¿Quiénes conforman la asociación civil?

Candelaria Integrada está constituida por productores y profesionales agropecuarios, empresas agropecuarias.

4. ¿Qué problemas identifican los miembros de la asociación civil?

La problemática más importante se centraliza en algunas obras mal proyectadas por la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH) en el área de servicios del Ente Candelaria, canales ejecutados por terceros privados no aprobados por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe, inundaciones de áreas productivas y en centros urbanos durante períodos húmedos, necesidad de mayor cantidad de estaciones hidro meteorológicas, falta de evaluación de la SRH a las pre factibilidades hídricas presentadas por el Ente Candelaria con la finalidad de disminuir los riesgos de inundaciones en el área de servicios del Ente, sin respuestas al Programa de Alertas Tempranas presentado oportunamente, entre otros temas.

5. ¿Qué medidas proponen para resolver los problemas identificados?

El Ente Candelaria realiza gestiones ante la Autoridad de Aplicación – SRH con propuestas y pre factibilidades hídricas enviadas por notas, reuniones con técnicos de las áreas públicas, en el marco del Plan Hidroproductivo, Vial y Ambiental presentado oportunamente, también ante Municipios y Comunas del área de servicios mediante el Plan de Ordenamiento Urbano; recientemente hemos realizado reuniones con INTA Oliveros a los efectos de integrar “el manejo del agua en función de la producción”.

6. ¿Trabajan en conjunto con Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe?

Todas las iniciativas propuestas y gestiones realizadas por el Ente Candelaria son informadas a la SRH, Ministerio de Obras Públicas y a los productores asociados. No siempre los funcionarios políticos de la SRH se involucran en las gestiones que realiza el Ente desde hace muchos años.

7. ¿Qué zonas/localidades abarca la asociación civil?

El área de servicios del Ente Candelaria es de aproximadamente 120.000 ha, y comprende a los municipios de Arequito, Chabás, Sanford, Los Molinos y Casilda.

**9.2.2.Ing. Silvina Martín - Secretaría de Recursos Hídricos - Sistemas de Predicción Hidrológica  
(15/10/2024)**

1. ¿En qué puntos del sur de Santa Fe tienen instalados instrumentos de medición?

En el año 2007 se crea la Red de Medición Telemétrica, mediante una licitación pública que fue adjudicada a la empresa Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA), instalándose 28 estaciones en la zona sur de la provincia, en las localidades:

- Los Quirquinchos (A1).
- Firmat (A1).
- Casilda (A1).
- Fuentes (A1-Gabinete, Cerco y Pozo freático).
- Alvarez (A1-Gabinete, Cerco y Pozo freático).
- Chabas (A2-Pozo freático).
- Villada (B1).
- Bigand (B1).
- Sanford (B1).
- Coronel Arnold (B1).
- Pueblo Muñoz (B1).
- Ovidio Lagos y Saladillo (B1-Bunker).
- Piñeiro (B1).
- Roldán (A1).
- Ibarlucea (A1).
- Pérez (A1-Cerco y Pozo freático).
- Zavalla (A2)
- Presa Descarga (B2)
- Presa Embalse (B2)
- Arroyo Ludueña
- Canal la Media Legua (B1-Bunker)
- Canal la Media Legua (B1)
- R.N. N°A-012 y R.N. N°33 (B1)
- Canal Peretti (B1)
- Camping Municipal de Ibarlucea (B1-Bunker)
- Logaritmo (B1)
- Salvat
- Entubamiento (B1-Bunker)

Estas estaciones están dispuestas en la cuenca de los Arroyos Ludueña y Saladillo. Necesitan un mantenimiento permanente, sino se pierden datos.

2. ¿Qué mide ese instrumento?

Depende de la localidad, existen estaciones pluviométricas, que se encargan de medir precipitaciones, también estaciones hidrométricas, que únicamente miden altura de agua y algunas estaciones pluviométricas, que miden tanto altura de agua como precipitación.

El intervalo de tiempo depende del pico máximo de acuerdo al tiempo de concentración de la cuenca. Si ocurre por ejemplo una crecida, la variación de alturas hidrométricas es muy rápida, para lo cual estos instrumentos permiten cambiar el intervalo hasta 15 minutos.

Existe una web de acceso privado mediante usuario y contraseña, creada por EVARSA, donde se pueden visualizar de forma remota los datos observados. Se cuenta con el inconveniente de no poder descargar los datos, debido a que ese ítem no fue incluido en la licitación, por lo cual se están llevando reuniones para poder incluirlo. Hoy la descarga es de forma manual, punto por punto.

3. ¿En qué periodo de tiempo se registraron datos en cada punto?

Para el año 2019, solo quedaban en funcionamiento cuatro (4) de ellas:

- Villada (B1) - Arroyo Saladillo.
- Coronel Arnold (B1) - Arroyo Saladillo.
- Piñeiro (B1) - Arroyo Saladillo.
- Arroyo Ludueña.

4. ¿Cuáles de esos instrumentos están dentro de la cuenca del Carcarañá?

En la red creada en el año 2007, no se instaló ningún instrumento dentro de la Cuenca del Río Carcarañá. A partir de la nueva licitación, llevada a cabo en el año 2022, pero efectuándose en mayo del año 2024, se cuenta con tres estaciones dentro de la Cuenca del Río Carcarañá, ubicándose dos de ellas en Cañada de Gómez, una en el puente ubicado en calle Bolivia (Estación hidrométrica) y otra en la represa de Molino Juan Semino S.A. (Estación pluviométrica), y la última en la localidad de Arteaga, en el puente de la Ruta Nacional N°15 (Estación hidrométrica cada 4 hs).

5. ¿Existen planes para instalar nuevos equipos de medición?

Se plantea instalar una futura estación en la localidad de Bouquet.

6. ¿Qué medirán esos equipos?

La estación que se plantea instalar en Bouquet sería una estación pluviométrica, que mediría únicamente precipitaciones. Además, en dicha localidad existe actualmente una estación hidrométrica perteneciente a Nación, por lo cual, uniendo ambos datos se podrá contar con mediciones pluviométricas en dicha ubicación.

7. ¿Tiene la secretaría algún informe sobre riesgos hídricos en el sur de la provincia?

La SRH cuenta con análisis de riesgo hídrico, pero enfocado de manera particular a loteos, es decir, un particular solicita evaluar la zonificación de su parcela dentro de la ley riesgo hídrico, partiendo de la base de modificar el escurrimiento natural. No se cuenta con análisis generales de la provincia, que cubran una o varias localidades, esto había sido realizado por la Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Santa Fe (IDESF), pero con un criterio completamente distinto, basándose en cartas topográficas e imágenes satelitales, sin que intervengan recurrencias, es decir que se trata únicamente de una clasificación cualitativa y no cuantitativa. En cambio, en el análisis realizado por SRH se utilizan por lo menos dos recurrencias, R=20 años y R=100 años.

8. ¿Esa información corresponde a su área o hay otras áreas que abordan esta problemática? En caso de ser otras áreas ¿Con quién se puede hablar?

Esta información de riesgo hídrico corresponde a otra área, específicamente la de Riesgo Hídrico, encargada de realizar los informes y análisis de los documentos enviados por cada particular. Se pueden comunicar para conocer más al respecto con Federico Sadone.

9. Breve explicación del sistema de alerta de inundaciones.

Existe un procedimiento definido en el cual se determinan tres (3) niveles de alerta:

- Nivel Inicial (Técnico): se trata de un alerta técnico donde se detecta un aumento de alturas hidrométricas por encima de los valores normales, sin que esto represente un riesgo inminente para la población. En este nivel, se activa un monitoreo constante y se informa a las autoridades para mantener vigilancia y evaluar la evolución del caudal. No se informa a la población, es solo comunicación interna.
- Nivel de Alerta: previamente realizado un estudio hidráulico se fijan niveles de alerta para cada curso de agua. Cuando la altura hidrométrica sobrepasa este nivel, se activa la alerta, debido a que podría representar riesgo de inundación para determinada zona. Se comienza a informar a la población para que estén atentos ante cualquier instrucción. Se forman equipos de trabajo según el conocimiento del terreno, de la cuenca, se involucra a Comités de Cuenca, Defensa Civil, representantes del gobierno provincial y de las comunas. En este punto, se considera la posibilidad de evacuar las áreas más vulnerables y se intensifica la preparación de recursos y personal.
- Nivel de Riesgo: es el nivel más alto, que implica que las inundaciones pueden ser inminentes o están ocurriendo en áreas críticas. Las autoridades activan planes de evacuación, alertan a la población en riesgo y movilizan equipos de respuesta de emergencia.

Estos niveles permiten una respuesta gradual y planificada ante posibles inundaciones, y están diseñados para proteger tanto a la población como a la infraestructura mediante alertas tempranas y la movilización de recursos.

10. ¿Funciona algún sistema de alerta de inundaciones en conjunto con la provincia de Córdoba?

No hay comunicación con Asuntos Hídricos de Córdoba, pero sería interesante que existiera, ya que en ciertos eventos del pasado hubiera ayudado a prepararse mejor y anteponerse a la situación.

**9.2.3.Ing. Raúl Navarro - Sub Director de la Delegación Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (29/11/2024)**

1. ¿Cuál es su cargo y función dentro de la SRH?

Soy Sub Director de la Delegación Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe y mi función es velar por el funcionamiento administrativo de la Delegación y atender los reclamos y necesidades sobre temas hídricos de las organizaciones estatales y de los privados en la zona sur de la Provincia delimitada por el Río Carcarañá.

*Comentarios: ¿Cuál es la diferencia entre privado y particular? Privado se puede considerar a una empresa que requiera de un abordaje a una problemática hídrica y la misma tenga los recursos para realizarlo y además tiene la capacidad de realizar el reclamo directamente a la SRH (un ejemplo es un parque industrial). Un particular hace el reclamo a la comuna y la comuna lo notifica a la SRH.*

2. ¿Cómo se vincula la SRH con la Universidad y con el CONICET? ¿Nos podría citar ejemplos?

La vinculación se formaliza mediante convenios marcos preexistentes y se inicia a través de decisiones de las autoridades políticas para encarar el estudio de alguna problemática para lo cual se organizan términos de referencia y un presupuesto. Si el mismo es aprobado se firma un convenio específico de colaboración y a partir del mismo empiezan a trabajar las áreas técnicas provinciales designadas como inspectoras del trabajo junto al comitente. No tengo conocimiento sobre convenios con CONICET pero si con el Instituto Nacional del Agua. Actualmente se está desarrollando un convenio para actualizar los estudios hidrológicos – hidráulicos de la presa de retención de crecidas del Arroyo Ludueña. Por el lado de la Universidad, en Santa Fe hay convenios con la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas y con la Universidad Tecnológica Nacional. Se está tramitando un convenio con la Universidad Nacional de Rosario para el estudio de la cuenca del Arroyo Saladillo.

3. ¿Tienen comunicación con el Gobierno de Córdoba? (O la secretaría de recursos hídricos de allá).  
¿Con quienes se reúnen?

Hay contacto con el Gobierno de Córdoba y con la Secretaría de Recursos Hídricos cordobesa desde las oficinas de Santa Fe por lo cual no estoy al tanto de los alcances de esas actividades.

*Comentarios: Existen relaciones interprovinciales pero de ello se encarga la sede en Santa Fe. Además, se mencionó que existe mucha comunicación entre nuestra Provincia y Santiago del Estero debido a las problemáticas hídricas de la región de Tostado.*

4. ¿Cómo es la metodología para abordar una problemática hídrica en la SRH? ¿Cómo identificar esta problemática?

Normalmente el abordaje comienza a partir de un reclamo realizado por un Municipio o por una Comuna referido a una problemática hídrica que afecta a varios pobladores o a algún particular. Las problemáticas normalmente se originan en un problema de desagüe, en inundación o en falta o mal estado de una obra hídrica vial.

5. Cuando alguna organización de la Sociedad Civil les hace llegar alguna propuesta de solución o abordaje de problemas vinculados con la SRH ¿Cuáles son los requisitos para que la SRH apruebe esta propuesta?

Los proyectos que se presentan para su aprobación deben responder a la ley de Aguas de la Provincia No 13740. Allí se explicita el alcance de los estudios necesarios y la documentación a presentar. Las áreas de planificación y de proyectos de la Secretaría analizan los planteos y evalúan si están dentro de la planificación de funcionamiento del sistema hídrico involucrado que la Secretaría ha pensado o si es algo nuevo es analizado desde el punto de vista de los lineamientos generales de la Repartición. Normalmente estos proyectos si son aprobados continúan un camino interno para su financiamiento por lo cual este factor también es decisivo a la hora de la evaluación.

6. ¿Qué mecanismos tiene la SRH para abordar las problemáticas que plantea el Sector Privado?

La Secretaría vela por los intereses públicos o sea por la seguridad de las personas y no aborda problemáticas privadas. Las temáticas de la Secretaría responden al funcionamiento de sistemas hídricos que van más allá de un privado sino que involucran intereses de distintos particulares, de diferentes distritos y hasta de diferentes provincias. Si un privado plantea una obra para solucionar un problema propio debe demostrar que la solución que propone no afectará a otros habitantes y para ello deberá plantear la solución integral que se requiera. Luego el Estado definirá la forma de su ejecución de acuerdo a sus intereses y a sus capacidades económicas.

7. ¿La SRH trabaja de manera conjunta con otras dependencias del gobierno de la provincia de Santa Fe? Ej. Ministerio de la Producción, Ambiente, etc. ¿Con quiénes?

La Secretaría trabaja con esos otros Ministerios y también con Gobierno, las Cámaras, Defensa Civil y Defensoría del Pueblo. En mi caso los temas tratados han sido urbanizaciones, parques industriales, contaminaciones, reclamos entre privados, inundaciones.

8. ¿Existe un relevamiento continuo de canalizaciones informales de parte de la SRH? ¿Cuál es el accionar cuando se las identifica? ¿Existe normativa vigente respecto a canalizaciones informales? ¿Existe alguna medida punitiva o de sanción? De existir estas medidas, ¿Cómo las aplican?

Se han hecho relevamientos de manera esporádica los cuáles han generado un volumen de trabajo mayor a la capacidad de los equipos disponibles de trabajo. Hay un área específica que atiende las

problemáticas siguiendo la Ley de Aguas. El área intima al propietario del lote donde reside el problema a presentar los estudios hidrológicos – hidráulicos que justifiquen la obra denunciada lo cual debe ser realizado siguiendo la Ley de Aguas. Hay medidas punitorias pero desconozco de qué tratan.

*Comentarios: ¿Cuál es éste área que nombra? ¿Está dentro del SRH o es otra entidad? Es una oficina específica dentro del SRH denominada “Unidad de Atención de Procedimientos”. El proceso comienza cuando se recibe la denuncia del particular que recibe el aporte de un curso informal el cual genera anegamiento dentro de su jurisprudencia. Luego, se comienza una investigación por parte del área en cuestión, se solicita acceso al terreno del denunciante y se atan cabos para determinar desde donde comienza la problemática, analizando las fotografías y demás datos relevantes.*

9. La cuenca del Carcarañá: ¿Por qué siendo un eje productivo importante de la provincia está poco estudiada por la SRH? Si se estudia, ¿Qué estudios se hicieron? En función de esos estudios, ¿Que se mide? ¿Y por qué se enfoca tanto la SRH en la cuenca del Saladillo y Ludueña?

La cuenca del Río Carcarañá es muy grande y posee múltiples estudios realizados sobre ella. La mayoría son sobre subcuencas que aportan al río. El estudio integral que más recuerdo es uno que se centró en evaluar el mismo como vía navegable. El río fue utilizado en otros tiempos como fuente de energía hidroeléctrica pero el comportamiento torrencial del mismo hizo que sólo una presa se mantenga actualmente en funcionamiento y que está operada de manera privada. Actualmente hay una campaña de mediciones hidrológicas sobre el cauce pero desconozco si existe algún plan de acción para lo cual esa información vaya a ser usada. Comparando los estudios que se llevan a cabo desde la casa central de la Secretaría en Santa Fe sobre toda la Provincia, los estudios en la cuenca del Ludueña y el Saladillo son mínimos. La mayor inversión entre estos dos ha sido en el Ludueña porque es la cuenca que afecta a la mayor cantidad de pobladores.

*Comentarios: ¿Recuerda algún estudio integral sobre el posible impacto social ante un evento?*

*No recuerda un estudio a nivel integral, pero sí que existió un estudio en el arroyo San Antonio (Tortugas) y se realizaron obras dentro del distrito correspondiente a Santa Fe, el estudio lo llevó a cabo la secretaria de Córdoba y lo ejecutó un privado. Se mencionó también que el SRH quiso intervenir para estudiar la viabilidad del proyecto pero no hubo una buena comunicación con el privado cuando se solicitó información al respecto.*

*Además, considera que se debería de tener zonas de riesgo hídrico por lo menos en las zonas de la Rivera, Oliveros, Timbúes, Villa Eloísa, Carcarañá y Pueblo Andino.*

10. ¿Qué cree que le haría falta a la secretaria para mejorar su funcionamiento?

Le haría falta un plan de recomposición de su planta técnica y una planificación a mediano plazo de sus actividades.

11. Actualmente, ¿Se realizan capacitaciones e implementación de nuevas tecnologías dentro de la SRH?

La secretaría no está generando capacitaciones sino que todo aquello que hacen los agentes es por cuenta propia o interés propio y si se facilita la participación en capacitaciones generadas por otras entidades externas a ella. En el ámbito de las nuevas tecnologías también hay algún avance de la mano del interés de las jefaturas de área de los equipos técnicos de planta permanente.

*Comentarios: Se incorporaron drones para relevamiento topográfico, GPS geodésicos para relevamiento y equipamiento para aforo de caudales. El problema con esto, como ya se mencionó anteriormente, es que no existe una iniciativa para capacitación del personal para el uso de estas herramientas.*

### 9.3. Scripts para ajuste de Ley H-Q

#### 9.3.1. Método 3

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from math import sqrt
from matplotlib.gridspec import GridSpec
import matplotlib
matplotlib.use('TkAgg')
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Cargamos los datos de entrada
df = pd.read_csv('D:/Desktop/Ajuste/Libro1.csv', delimiter=";")
Altura = df['H'].values
Caudal = df['Q'].values

# Definimos el rango de valores para a, b y c
a_values = np.arange(7.18, 41.98, 0.01)
b_values = np.arange(-1.05, 1.16, 0.01)
c_values = np.arange(0.98, 2.75, 0.01)

# Y la función de la ecuación
def equation(x, a, b, c):
    return a * (x - b) ** c

# Con métricas MSE, luego se le aplica la raíz para calcular el RMSE, R² y EP%
def mse(y_obs, y_pred):
    return np.mean((y_obs - y_pred) ** 2)
def r_squared(y_obs, y_pred):
    ss_res = np.sum((y_obs - y_pred) ** 2)
    ss_tot = np.sum((y_obs - np.mean(y_obs)) ** 2)
    return 1 - (ss_res / ss_tot)
def mean_percentage_error(y_obs, y_pred):
    return np.mean(np.abs((y_obs - y_pred) / y_obs)) * 100

# Variables para almacenar los mejores valores, se inicia todo sin definir y el
error comienza siendo muy grande para ir ajustandolo con valores menores
best_a = None
best_b = None
best_c = None
best_error = float("inf")
best_r2 = None
best_percentage_error = None
```

```
# Se ajusta el exponente c primero
for c in c_values:
    best_b_temp = None
    best_error_temp = float("inf")

    # Se ajusta b con el mejor c
    for b in b_values:
        y_pred = equation(Altura, best_a if best_a is not None else 1, b, c)
        error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))
        r2 = r_squared(Caudal, y_pred)

        # Se verifica si es el mejor ajuste
        if error < best_error_temp:
            best_b_temp, best_error_temp, best_r2_temp = b, error, r2

    # Ahora se ajusta a con los mejores valores de c y b
    for a in a_values:
        y_pred = equation(Altura, a, best_b_temp, c)
        error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))
        r2 = r_squared(Caudal, y_pred)
        percentage_error = mean_percentage_error(Caudal, y_pred)

        # Se verifica si es el mejor ajuste
        if error < best_error:
            best_a, best_b, best_c, best_error, best_r2, best_percentage_error =
a, best_b_temp, c, error, r2, percentage_error

# Esta línea solo informa el mejor ajuste
print(f'Mejor ajuste: a = {best_a:.2f}, b = {best_b:.2f}, c = {best_c:.2f} con un
RMSE de {best_error:.2f}, R2 de {best_r2:.4f}, y ||Δx||% de
{best_percentage_error:.2f}%')

# -----GRÁFICOS-----
# A partir de acá es todo para configurar los gráficos
sns.set(style="whitegrid")
fig = plt.figure(figsize=(14, 10))
gs = GridSpec(3, 2, width_ratios=[1, 1], height_ratios=[1, 0.2, 1])
plt.rcParams.update({'font.size': 12, 'font.family': 'Times New Roman'})
title_color = '#999999'
axis_label_color = 'black'
def configure_axes(ax, xlabel, ylabel, title, rmse=None, r2=None,
percentage_error=None):
    ax.set_xlabel(xlabel, fontsize=13, color=axis_label_color)
    ax.set_ylabel(ylabel, fontsize=13, color=axis_label_color)
    ax.set_title(title, fontsize=16, color=title_color, pad=20)
    ax.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
```

```
if rmse is not None and r2 is not None and percentage_error is not None:
    ax.annotate(f'RMSE: {rmse:.2f}', xy=(0.05, 0.90), xycoords='axes
fraction',
                fontsize=12, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8,
edgecolor='black'))
    ax.annotate(f'R2: {r2:.4f}', xy=(0.05, 0.80), xycoords='axes fraction',
                fontsize=12, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8,
edgecolor='black'))
    ax.annotate(f' ||Δx||%: {percentage_error:.2f}%', xy=(0.05, 0.70),
xycoords='axes fraction',
                fontsize=12, bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.8,
edgecolor='black'))

# Gráfico superior izquierda - Datos observados y curva
ax1 = fig.add_subplot(gs[0, 0])
ax1.scatter(Altura, Caudal, label='Datos observados', color='#999999',
edgecolor='black', s=50)
ax1.plot(np.linspace(min(Altura), max(Altura), 100),
         equation(np.linspace(min(Altura), max(Altura), 100), best_a, best_b,
best_c),
         color='black', label=f'Curva ajustada (a={best_a:.2f}, b={best_b:.2f},
c={best_c:.2f})', linestyle='-')
configure_axes(ax1, 'Altura [m]', 'Caudal [m3/s]', 'Ajuste de curva con mejores
valores de a, b y c', best_error, best_r2, best_percentage_error)
ax1.legend()

# Gráfico superior derecha - RMSE vs c
ax2 = fig.add_subplot(gs[0, 1])
rmse_c_values = []
for c in c_values:
    best_b_temp = None
    best_error_temp = float("inf")

    for b in b_values:
        y_pred = equation(Altura, best_a if best_a is not None else 1, b, c)
        error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))

        if error < best_error_temp:
            best_b_temp, best_error_temp = b, error

    rmse_a_values = []
    for a in a_values:
        y_pred = equation(Altura, a, best_b_temp, c)
        error = sqrt(mse(Caudal, y_pred))
        rmse_a_values.append(error)

    rmse_c_values.append(min(rmse_a_values))
```

```
ax2.plot(c_values, rmse_c_values, color='#999999', marker='o', markersize=3)
figure_axes(ax2, 'c', 'RMSE', f'Variación de RMSE en función de c
(a={best_a:.2f}, b={best_b:.2f})', None, None)

# Gráfico inferior derecha - RMSE vs b, con mejor c y a.
ax3 = fig.add_subplot(gs[2, 1])
rmse_b_values = []
for b in b_values:
    y_pred = equation(Altura, best_a, b, best_c)
    rmse_b_values.append(sqrt(mse(Caudal, y_pred)))

ax3.plot(b_values, rmse_b_values, color='#999999', marker='o', markersize=3)
figure_axes(ax3, 'b', 'RMSE', f'Variación de RMSE en función de b
(a={best_a:.2f}, c={best_c:.2f})', None, None)

# Gráfico inferior izquierda - RMSE vs a, con mejor c y b.
ax4 = fig.add_subplot(gs[2, 0])
rmse_a_values = []
for a in a_values:
    y_pred = equation(Altura, a, best_b, best_c)
    rmse_a_values.append(sqrt(mse(Caudal, y_pred)))

ax4.plot(a_values, rmse_a_values, color='#999999', marker='o', markersize=3)
figure_axes(ax4, 'a', 'RMSE', f'Variación de RMSE en función de a
(b={best_b:.2f}, c={best_c:.2f})', None, None)

plt.subplots_adjust(left=0.4, right=0.9, top=0.9, bottom=0.4, hspace=0.4,
wspace=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

### 9.3.2.Método 5

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from math import sqrt
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib
matplotlib.use('TkAgg')

# Cargamos los datos de entrada
df = pd.read_csv('D:/Desktop/Ajuste/Libro1.csv', delimiter=";")

Altura = df['H'].values
Caudal = df['Q'].values

# Definimos la ecuación a optimizar
def equation(x, a, b, c):
    return a * (x - b) ** c

# Y las métricas de error
def mse(y_obs, y_pred):
    return np.mean((y_obs - y_pred) ** 2)

def r_squared(y_obs, y_pred):
    ss_res = np.sum((y_obs - y_pred) ** 2)
    ss_tot = np.sum((y_obs - np.mean(y_obs)) ** 2)
    return 1 - (ss_res / ss_tot)

def mean_percentage_error(y_obs, y_pred):
    return np.mean(np.abs((y_obs - y_pred) / y_obs)) * 100

# Establecemos la función de pérdida (RMSE) a minimizar
def loss(params):
    a, b, c = params
    y_pred = equation(Altura, a, b, c)
    return sqrt(mse(Caudal, y_pred))

# Con el rango inicial de parámetros [a, b, c] y límites
initial_guess = [25.41, -0.43, 1.67]
bounds = [(7.18, 41.98), # Límite para a
          (-1.05, 1.16), # Límite para b
          (0.98, 2.75)] # Límite para c

# Se ejecuta la minimización para encontrar los mejores valores de a, b, y c con límites
result = minimize(loss, initial_guess, method='L-BFGS-B', bounds=bounds)
```

```
# Resultados de optimización
best_a, best_b, best_c = result.x
best_error = loss(result.x)
best_r2 = r_squared(Caudal, equation(Altura, best_a, best_b, best_c))
best_percentage_error = mean_percentage_error(Caudal, equation(Altura, best_a,
best_b, best_c))

# Se imprime el mejor ajuste
print(f'Mejor ajuste: a = {best_a:.2f}, b = {best_b:.2f}, c = {best_c:.2f} con un
RMSE de {best_error:.2f}, R2 de {best_r2:.4f}, y ||Δx||% de
{best_percentage_error:.2f}%')

# -----GRÁFICOS-----
# Código de configuración y gráficos
sns.set(style="whitegrid")
fig = plt.figure(figsize=(14, 10))
plt.rcParams.update({'font.size': 18, 'font.family': 'Times New Roman'})
title_color = '#999999'
axis_label_color = 'black'

# Configurar gráfico principal con los datos observados y la curva ajustada
plt.scatter(Altura, Caudal, label='Datos observados', color='#999999',
edgecolor='black', s=50)
plt.plot(np.linspace(min(Altura), max(Altura), 100),
equation(np.linspace(min(Altura), max(Altura), 100), best_a, best_b,
best_c),
color='black', label=f'Curva ajustada (a={best_a:.2f}, b={best_b:.2f},
c={best_c:.2f})', linestyle='-')
plt.xlabel('Altura [m]', fontsize=18, color='black')
plt.ylabel('Caudal [m3/s]', fontsize=18, color='black')
plt.title('Ajuste de curva con valores optimizados de a, b y c', fontsize=24,
color='#999999', pad=20)
plt.legend(fontsize=16)
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
plt.show()
```