

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de ingeniería, ciencias naturales y museo



***IMPACTO DE LOS CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO SOBRE EL
BALANCE HÍDRICO EN ZONAS DE LLANURA.
CASO DE ESTUDIO, CUENCA SUPERIOR DEL ARROYO DEL AZUL.
(PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA)***

Tesis de Maestría presentada por la
Geóloga *ANA MARÍA PINILLA MENDOZA*
Ante la Facultad de Ingeniería, Ciencias Naturales y Museo
de la Universidad Nacional de La Plata para optar el grado académico de

MAGISTER EN ECOHIDROLOGÍA

Director: Dr. Ing. Cristian Guevara Ochoa
Codirectores: Dr. Bruno Lara y Dr. Eduardo Kruse.

Febrero, 2023

Agradecimientos

Profundamente agradecida con:

Mi director de tesis, Cristian Guevara, por su constante e incondicional apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Los codirectores, Bruno Lara y Eduardo Kruse, por la buena disposición siempre para orientarme con sus aportes y recomendaciones. Especialmente agradecida con Bruno Lara por compartir de forma cariñosa sus conocimientos, gracias por tu amistad y empatía.

El Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), por proporcionarme la información necesaria para cumplir con los objetivos de esta tesis. Sin sus contribuciones este trabajo hubiera sido mucho más difícil.

Cada uno de los docentes y compañeros de maestría, todas y todos hicieron de esta etapa una experiencia fuertemente enriquecedora.

Mi familia, por cumplir con la tarea más vital e importante de todas, llenar mi vida de cuidados y amor. Profunda gratitud principalmente con mi mamá quien nunca dejó de creer en mí y a quien siempre sentí a mi lado recordándome que todo lo puedo lograr. Todos ustedes son mi ejemplo.

Todas las personas que estuvieron presentes y colaboraron de una u otra forma en alguna de las etapas de esta tesis, desde su planteamiento hasta su defensa. Gracias por el tiempo, cariño y palabras alentadoras, han hecho de Argentina un hogar para mí.

Índice

<i>Lista de Figuras</i>	6
<i>Lista de Tablas</i>	8
<i>Organización de la Tesis</i>	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Antecedentes	16
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivos	19
1.4.1 General	19
1.4.2 Específicos	19
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1 Hidrología de llanuras	20
2.2 Extremos hídricos	21
2.2.1 Inundaciones en zonas de llanura	21
2.2.2 Sequías	22
2.3 Modelos matemáticos para la evaluación hidrológica	23
CAPÍTULO 3: ZONA DE ESTUDIO	26
3.1 Ubicación	26
3.2 Clima	27
3.3 Geología	27
3.4 Geomorfología	29
3.5 Hidrología e hidrogeología	30
3.6 Tipos de suelo	31
3.7 Cobertura vegetal	31
CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS	35
4.1 Generación de mapas de usos del suelo	35
4.1.1 Imágenes satelitales	35
4.1.2 Clasificación y obtención de coberturas del suelo	36
4.1.3 Validación	38
4.2 Modelación hidrológica (modelo SWAT)	39
4.2.1 Datos de entrada al modelo SWAT	40
4.2.1.1 Datos meteorológicos	41
4.2.1.2 Modelo digital de elevación (MDE)	43
4.2.1.3 Tipos de suelo	45
4.2.1.4 Usos de suelo	46
4.2.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico	47
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
5.1 Caracterización de coberturas y usos del suelo	49
5.1.1 Validación de los mapas de coberturas y usos del suelo	51
5.2 Análisis espacio-temporal de los usos del suelo	53

5.2.1 Cambios espacio-temporales de las Pasturas y Pastizales Naturales	53
5.2.2 Cambios espacio-temporales de los cultivos de trigo-soja.....	55
5.2.3 Cambios espacio-temporales del cultivo de soja.....	57
5.2.4 Cambios espacio-temporales del cultivo de maíz	57
5.2.5 Cambios espacio-temporales de los cultivos de invierno	60
5.2.6 Cambios espacio-temporales del cultivo de girasol	60
5.3 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT	62
5.4 Comparación de balances hídricos	65
5.4.1 Balance hídrico promedio anual.....	65
5.4.1.1 Caudales promedio anuales	66
5.4.1.2 Balance hídrico promedio anual para las subcuencas	68
5.4.1.3 Balance hídrico espacio-temporal promedio anual	69
5.4.2 Balance hídrico promedio mensual.....	72
5.4.2.1 Caudal promedio mensual.....	73
5.5 Susceptibilidad de los usos del suelo ante inundaciones y sequías	73
<i>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....</i>	78
<i>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....</i>	83
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	86
<i>ANEXOS</i>	95

Lista de Figuras

Figura 2.1. Secuencia evolutiva de los diferentes tipos de sequías. Adaptado de Guevara-Ochoa (2019).....	23
Figura 3.1. Ubicación geográfica de la cuenca superior del arroyo Del Azul.	26
Figura 3.2. Distribución espacial de la precipitación promedio anual para el periodo 2006-2014 en la cuenca superior del arroyo Del Azul. Tomado de Guevara-Ochoa et al. (2017)	27
Figura 3.3. Mapa geológico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Tomado de Rimoldi y Soriano (1999).....	28
Figura 3.4. Mapa geomorfológico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Adaptado de Zárate y Mehl (2010).	29
Figura 3.5 Superficie cultivada en el partido de Azul. Cosecha 2017-2018	32
Figura 4.1. Curvas estacionales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada una de las 15 clases resultantes.	38
Figura 4.2. Diagrama de los datos de entrada del modelo SWAT.	41
Figura 4.3. Estaciones hidrometeorológicas y meteorológicas en la cuenca superior del arroyo Del Azul.	42
Figura 4.4. Precipitación y temperatura máxima y mínima promedio anual para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul.	42
Figura 4.5. Precipitación y temperatura máxima y mínima promedio mensual para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul.	43
Figura 4.6. Modelo digital de elevación de la cuenca superior del arroyo Del Azul.....	44
Figura 4.7. Mapa de pendientes de la cuenca superior del arroyo Del Azul.	45
Figura 4.6. Series de suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul.....	46
Figura 5.1. Porcentaje de área ocupada por los diferentes usos del suelo en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.....	49
Figura 5.2. Mapas de usos del suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.....	50
Figura 5.3. (a). Mapas de cambios espacio temporales de las pasturas y pastizales naturales (ppn) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a las pasturas y pastizales naturales.....	54

Figura 5.4. (a). Mapas de cambios espacio temporales del sistema de doble cultivo trigo-soja (trsj) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de trigo-soja	56
Figura 5.5. (a). Mapas de cambios espacio temporales del cultivo de soja (sj) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de soja.	58
Figura 5.6. (a). Mapas de cambios espacio temporales del cultivo de maíz (mz) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de maíz.	59
Figura 5.7. (a). Mapas de cambios espacio temporales de los cultivos de invierno (cinv) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de invierno.	61
Figura 5.8. Mapa de cambios espacio temporales del cultivo de girasol (gs) y área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de girasol del escenario p1 al p2.	62
Figura 5.9. Evolución de caudales diarios observados y calculados para el período de calibración (2006-2011)	64
Figura 5.10. Evolución de caudales diarios observados y calculados para el periodo de validación (2012-2015)	65
Figura 5.11. Balance hídrico anual simulado para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	67
Figura 5.12. Caudales promedio anuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	68
Figura 5.13. Variación espacio-temporal del balance hídrico promedio anual en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.....	71
Figura 5.14. Balance hídrico promedio mensual simulado para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	74
Figura 5.15. Caudales promedio mensuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	75
Figura 5.16. Caudales pico promedio anuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	75
Figura 5.17. Comparación del balance hídrico mensual para los años 2008 y 2012 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.	77

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Comparación de las características de los paisajes llanos y de los paisajes con relieve. Adaptado de damiano et al. (1989).....	20
Tabla 4.1. Descripción de las coberturas y usos del suelo presentes en la cuenca superior del arroyo del azul.	37
Tabla 4.2. Clasificación del coeficiente kappa. Tomado de congaltón (1991).	39
Tabla 4.3. Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas ubicadas en la cuenca superior del arroyo del azul.....	41
Tabla 4.4. Características morfológicas de las subcuencas azul superior, santa catalina y videla	44
Tabla 4.5. Caracterización de las series de suelos de la cuenca superior del arroyo del azul.	47
Tabla 5.1. Área (km ²) ocupada por cada uso del suelo para los tres periodos propuestos en la cuenca superior del arroyo del azul	51
Tabla 5.2. Matriz de confusión para el mapa de usos del suelo del escenario p1.....	52
Tabla 5.3. Matriz de confusión para el mapa de usos del suelo del escenario p3.....	52
Tabla 5.4. Parámetros de entrada al modelo swat.....	63
Tabla 5.5. Resultados estadísticos entre el caudal diario observado y calculado en la estación seminario, con el modelo swat.....	64
Tabla 5.6. Porcentajes del balance hídrico promedio anual de la cuenca superior del arroyo del azul para los escenarios propuestos.....	66
Tabla 5.7. Balance hídrico promedio anual para las subcuencas azul superior, videla y santa catalina para los tres escenarios de usos del suelo propuestos.....	69
Tabla A1. funciones de pedotransferencia para los horizontes de cada serie de suelo	95
Tabla A.2. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación azul (smn)	98
Tabla A.3. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación chillar	98
Tabla A.4. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación cerro del águila.....	99
Tabla A.5. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación germania.....	99
Tabla A.6. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación chiquita	100
Tabla A.7. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación siempre amigos.....	100
Tabla A.8. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación firmeza	101

Organización de la Tesis

La tesis está organizada en 7 capítulos de la siguiente forma:

En el capítulo 1, se expone a modo de introducción la problemática que motivó a realizar este trabajo. Además, se menciona la información antecedente más relevante de trabajos con similar temática que se han realizado hasta el momento. Asimismo, este capítulo contiene la hipótesis planteada y los objetivos, tanto general como específicos.

El capítulo 2 comprende la fundamentación teórica con conceptos que sustentan esta tesis. Inicialmente se presenta el modelo conceptual del movimiento de agua en sistemas de llanuras y el impacto de los extremos hídricos en estos ambientes. Seguidamente, se describen los modelos matemáticos para evaluar el recurso hídrico.

En el capítulo 3 se describe la zona de estudio, sus características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas, así como los tipos de suelo, su cobertura vegetal y el clima.

El capítulo 4 corresponde a los materiales y métodos usados para simular los procesos hidrológicos de la cuenca. En primer lugar, se explica el proceso de caracterización de los usos del suelo y los materiales usados para realizar los mapas de usos del suelo de la cuenca. También se detalla el modelo hidrológico continuo implementado, los datos de entrada y finalmente, se presenta la descripción de cómo se realizó el análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros y los estadísticos implementados para la calibración y validación del modelo en la zona de estudio.

En el capítulo 5, se analizan e interpretan los resultados obtenidos. Se empieza por la caracterización de los usos del suelo, por medio del cual se detectan los cambios espaciales en un periodo de tiempo de las diferentes coberturas. Seguidamente se presentan los parámetros más sensibles, la calibración y validación del modelo SWAT. Con los resultados de la simulación se comparan los balances hídricos y la variación de los caudales para los tres escenarios de usos del suelo analizados, tanto a escala anual como mensual. Por último, se evidencia el grado de susceptibilidad frente a los cambios de usos del suelo ante inundaciones y sequías.

En el capítulo 6 se discuten los resultados obtenidos. Se enfatiza en el impacto que los cambios en el uso del suelo generan en la respuesta espacial del balance hídrico a través del tiempo. Además, se resaltan las limitaciones e incertidumbres en la caracterización de usos del suelo y en el modelado hidrológico.

Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones a las que se llegaron con esta tesis.

RESUMEN

Los constantes cambios en el uso del suelo, provocados principalmente por el fenómeno de agriculturización, ha facilitado el predominio de cultivos de alta rentabilidad como la soja conduciendo a una menor diversidad de coberturas vegetales. Este hecho ha generado múltiples impactos principalmente en llanuras con alto potencial agrícola, ya que el aumento en la escala de explotación del suelo y las prácticas repetitivas alteran la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas y su interacción con los sistemas hídricos, terrestres y atmosféricos.

En cuanto al componente hídrico, algunos de los procesos que intervienen en el balance hídrico de las llanuras resultan ser más sensibles a los cambios de vegetación. Por lo tanto, se planteó como objetivo principal cuantificar el balance hídrico bajo tres escenarios de usos del suelo. Esto con el fin de realizar un análisis más preciso del impacto que estos cambios generan al balance hídrico de una zona de llanura. La llanura bajo estudio es la cuenca superior del arroyo Del Azul, región que ha seguido la misma tendencia de la llanura pampeana en su actividad agrícola y que, además, presenta de forma periódica eventos de inundaciones y sequías.

Para cumplir con el objetivo planteado, se simuló el balance hídrico de la cuenca empleando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). El balance hídrico se calibró y validó a escala diaria para un periodo de 13 años (2003-2015) y se contrastó con tres escenarios de usos del suelo para los periodos 2006-2007 (P1), 2010-2011 (P2) y 2015-2016 (P3). Los usos del suelo presentes en cada periodo fueron caracterizados por una metodología basada en la fusión de imágenes satelitales de media resolución. Los resultados obtenidos representaron con un nivel de certidumbre bastante aceptable el sistema agrícola de la cuenca, evidenciando en qué medida cada cobertura fue reemplazada por los diferentes usos del suelo y en qué sectores de la cuenca estos cambios tuvieron lugar. En términos generales, al comparar los cambios que se llevaron a cabo en el transcurso de 10 años (2006-2015), se encontró que el uso del suelo que representó la mayor cantidad de reemplazos fue el cultivo de soja aumentando alrededor de 280%. El sistema de doble cultivo trigo-soja mantuvo un porcentaje de ocupación de aproximadamente 35%, mientras que los cultivos de invierno, maíz y las pasturas y pastizales naturales disminuyeron cerca de un 5%, 67% y 52%, respectivamente.

En cuanto al proceso de simulación con SWAT, se logró cuantificar con un grado de acierto bastante satisfactorio el balance hídrico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. El ajuste del modelo se realizó con la información de caudales registrados en la estación hidrométrica de Seminario. Se obtuvo valores de Nash Sutcliffe (NS) y coeficientes de determinación (R^2) para el periodo de calibración (2006-2011) de 0,5 y 0,6 respectivamente y, para el periodo de validación (2012-2015) valores aproximados de 0,5, tanto para NS como para R^2 .

Los resultados de la simulación con SWAT permitieron analizar la dinámica espacial de los procesos hidrológicos a través del tiempo, de los cuales, la evapotranspiración y la recarga representaron aproximadamente el 94% de la precipitación anual. A grandes rasgos, la respuesta de la evapotranspiración no varió de forma representativa con cada escenario de usos del suelo. Por el contrario, variables como la escorrentía superficial y la recarga fueron los procesos que presentaron mayores alteraciones espacio-temporales. Con el escenario P2, la recarga aumentó un 5%, pero la escorrentía superficial decreció 14%. En cuanto al escenario P3, la escorrentía superficial se incrementó 5% y la recarga disminuyó 7%. De acuerdo a los resultados, se espera que con los usos del suelo caracterizados en el escenario P2 sea menor el impacto de las transformaciones de coberturas. Al presentar mayor diversidad de usos del suelo, con este escenario la resiliencia de la cuenca ante los extremos hídricos sería mayor que con usos del suelo más homogéneos

A escala mensual, se evidenció cómo el estado vegetativo de las coberturas influyó en la dinámica hídrica de la cuenca. Por eso a finales de primavera el déficit hídrico fue más severo con el escenario P3, ya que los cultivos que predominaron en este periodo entran en su etapa de maduración para esta época del año, aumentando la evapotranspiración y disminuyendo la humedad del suelo. Por el contrario, a finales de otoño, cuando gran parte de la superficie queda descubierta por la temporada de cosecha de cultivos de secano, la evapotranspiración fue más baja y la escorrentía superficial se incrementó y con ello, el impacto de las inundaciones. Adicionalmente, con SWAT fue posible identificar las regiones más vulnerables ante los excesos hídricos. Estas resultaron ser las zonas donde la pendiente es menor al 3%, es decir, hacia el norte de la cuenca, donde las pasturas y pastizales naturales fueron reemplazados en mayor medida.

Finalmente, con la cuantificación del balance hídrico a escala mensual y anual, se concluye que efectivamente los cambios en el uso del suelo han impactado en la dinámica hídrica de la cuenca superior del arroyo Del Azul, zona con características propias de las llanuras. Al comparar los balances hídricos para cada escenario de usos del suelo, se constató que cuando un territorio asume un régimen de monocultivo, como es el caso del escenario P3, aumenta la escorrentía superficial y disminuye la tasa de recarga y humedad del suelo, lo cual podría aumentar la magnitud del impacto cuando se presentan periodos de excesos hídricos. Por el contrario, cuando el paisaje agrícola es más heterogéneo, como el del escenario P2, la escorrentía superficial se reduce y la recarga incrementa haciendo que posiblemente la resiliencia de las llanuras ante las inundaciones sea mayor. Al analizar un año con bajo índice pluviométrico como el 2008, el escenario de uso del suelo P1 fue el que más conservó la humedad del suelo y produjo una menor evapotranspiración. Teniendo en cuenta que este escenario presentó el mayor porcentaje de área cubierta por pasturas y pastizales naturales, se podría afirmar que esta cobertura vegetal influye en reducir el impacto de las sequías. A escala mensual, en los meses de primavera la cuenca presentó mayor déficit hídrico

con el escenario P3, y en otoño inundaciones más severas. Por lo tanto, homogenizar el paisaje agrícola disminuye la resiliencia de la cuenca ante inundaciones y sequías. Igualmente, hay que resaltar que las prácticas agrícolas llevadas a cabo en las últimas décadas, no han tenido muy en cuenta factores, servicios y procesos naturales indispensables para un desarrollo sustentable de los territorios. Asimismo, se espera que los resultados obtenidos proporcionen pautas para que las entidades competentes formulen políticas y estrategias de gestión que protejan la economía y los ecosistemas de la región.

ABSTRACT

The constant changes in land use, caused mainly by the phenomenon of agriculturization, have facilitated the predominance of highly profitable crops such as soybeans, leading to a lower diversity of vegetation cover. This fact has generated multiple impacts mainly in plains with high agricultural potential, since the increase in the scale of soil exploitation and repetitive practices alter the structure and functioning of ecosystems and their interaction with water, land and atmospheric systems.

With regard to the water component, some of the processes involved in the water balance of the plains are more sensitive to the vegetation changes. Therefore, the main objective of this thesis is to quantify the water balance under three land use scenarios in order to perform a more precise analysis of the impact that changes in land use generate on the water balance in a plain area. The plain under study was the upper creek basin of Del Azul, which has followed the same agricultural activity of the Pampeana plains and also, this basin presents periodically floods and droughts.

In order to meet the proposed objective, the water balance of the basin was simulated using the semi-distributed hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT). The water balance was calibrated and validated on a daily scale for a period of 13 years (2003-2015) and compared with three land use scenarios for the periods 2006-2007 (P1), 2010-2011 (P2) and 2015-2016 (P3). The land uses for each period were characterized by a methodology based on the fusion of medium resolution satellite images. The results obtained represented the agricultural system of the basin with a fairly acceptable level of certainty, showing the extent of each coverage was replaced by the different land uses and in which sectors of the basin these changes took place. In general terms, when comparing the changes that were carried out in the course of 10 years (2006-2015), it was found that the land use that represented the highest number of replacements was the soybeans crop, increasing around 280%, the wheat-soybean double cropping system maintained an occupancy percentage of approximately 35%, while the winter crops, corn, and natural pastures and grasslands decreased by close to 5%, 67% and 52%, respectively.

Regarding the simulation process with SWAT, it was possible to quantify with a fairly satisfactory degree of accuracy the water balance in the upper creek basin of Del Azul. The model adjustment was carried out with the information of flows registered at the Seminario hydrometric station, obtaining values of Nash Sutcliffe (NS) and the determination coefficient (R^2) for the calibration period (2006-2011) of 0.5 and 0.6 respectively and, for the validation period (2012-2015) approximate values of 0.5, for both, NS and R^2 .

The results of the SWAT simulation allowed analyzing the spatial dynamics of hydrological processes over time, of which evapotranspiration and recharge accounted for approximately 94% of

annual precipitation. Broadly speaking, the evapotranspiration did not change in a representative way with each proposed land use scenario. By the other hand, variables such as surface runoff and recharge presented the greatest spatio-temporal alterations due to the different changes in coverage. With the P2 scenario, recharge increased 5%, but surface runoff decreased 14%. Regarding the P3 scenario, surface runoff increased 5% and recharge decreased 7%. According to the results, it is expected that with the land uses characterized in the P2 scenario, the impact of the coverage transformations will be less and the resilience of the basin to water extremes would be greater than with more homogeneous land uses.

The monthly water balance, evidenced how the vegetative state of the covers, influenced on the water dynamic in the upper creek basin of Del Azul. For this reason, at the end of spring, the water deficit was more severe with the P3 scenario because the crops predominated enter in their growth stage, increasing evapotranspiration and decreasing soil moisture. By contrast, in late autumn, when much of the area is uncovered by the rainfed harvest season, evapotranspiration was lower and surface runoff increased and with it, the impact of flooding. Additionally, with SWAT was possible to identify the most vulnerable regions to water excesses. These regions were at north of the basin, where the slope is less than 1% and where the pastures and natural grasslands were replaced in a greater extent.

Finally, with the quantification of the water balance on a monthly and annual scale, it is concluded that changes in land use have impacted on the water dynamics of the upper creek basin of Del Azul, a region with plain characteristics. When comparing the water balances for each scenario of land use, it was found that when a territory assumes a monoculture regime, as is the case of the P3 scenario, surface runoff increases and the recharge rate and soil moisture decrease, which it could raise the magnitude of the impact when there are periods of excess water. By the other hand, when the agricultural landscape is more heterogeneous, as P2 scenario, surface runoff is reduced and recharge increases, making the plains more resilient to floods events. In a year with a low rainfall index such as 2008, the P1 land use scenario helps to the soil moisture conservation and produced the least evapotranspiration. Taking into account that this scenario presented the highest percentage of area covered by pastures and natural grasslands, it could be affirmed that this land use reduces the impact of droughts. On a monthly scale, in the spring months the basin presented a greater water deficit with the P3 scenario and in autumn more severe floods. Therefore, homogenizing the agricultural landscape reduces the resilience of the plain basins to floods and droughts. Likewise, the results obtained are expected to provide guidelines for the competent entities to formulate policies and management strategies that protect the economy and ecosystems of the region.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El aumento de la población mundial junto al creciente avance tecnológico, han generado aceleradas transformaciones en la superficie terrestre. Una de ellas, es el cambio de coberturas y usos del suelo, fenómeno altamente dinámico que ha ocurrido en la mayoría de las grandes llanuras del mundo debido al alto potencial agrícola que estas poseen.

El proceso de agriculturización ha causado en las últimas décadas profundos impactos en el medio ambiente, como lo evidencia el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (Gao et al., 2017). Se estima que entre el 12% y el 26% de las emisiones totales de dióxido de carbono a la atmósfera son principalmente por la tala y quema de vegetación natural para cultivo y pastoreo (Houghton, 2003). A su vez, la actividad agrícola ha mostrado indicios de provocar aumentos en las fluctuaciones del clima regional y global (Pielke et al., 2002; Li et al., 2009), haciendo más frecuentes los eventos de inundaciones y sequías. Los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas como el carbono, fósforo y nitrógeno también han presentado desequilibrios (Lal, 2004), provocando que se reduzca la calidad del suelo y la productividad agrícola. Los cambios de cobertura y uso del suelo están estrechamente relacionados con los procesos hidrológicos (Harbor, 1994; Fohrer et al., 2001; Baker y Miller, 2013; Lamparter et al., 2016; Kroes et al., 2019), es por esto que la dinámica hídrica de las cuencas ha reportado variaciones en la tasa de intercepción, infiltración, evapotranspiración y recarga. Asimismo, se considera que los procesos agrícolas contribuyen como uno de los principales causantes de pérdida de biodiversidad y hábitats naturales (Vitousek et al., 1997; Viglizzo et al., 2001, 2003; Vázquez y Zulaica, 2013), así como de la simplificación estructural y funcional de los ecosistemas (Foley et al., 2005; Vázquez et al., 2016).

En la llanura Pampeana, considerada como una de las llanuras más grandes a nivel mundial, la producción agrícola se ha incrementado en gran medida durante los últimos 25 años (Paruelo et al., 2005). La producción de los principales granos (soja, maíz y trigo) pasó de 34 a 143 millones de toneladas entre 1996 y 2018 (FAOSTAT, 2018), convirtiendo a la agricultura en una fuente de divisas e ingresos fiscales clave para el país. Este fenómeno de expansión agrícola ha sido impulsado por un desarrollo tecnológico basado en cultivos transgénicos como la soja de segunda fecha (Aizen et al., 2009). Si bien este tipo de variedades transgénicas han resultado ser bastante rentables por su rápida expansión y mayor rendimiento (Satorre, 2005), también han inducido a la pérdida de recursos genéticos mediante la extinción de variedades de cultivos autóctonos por variedades mejoradas (FAO, 2012). Igualmente, han provocado el desplazamiento de la frontera agrícola y la simplificación del paisaje (Paruelo et al., 2005; Aizen et al., 2009; Barral y Maceira, 2012; Vázquez y Zulaica, 2013).

Con el fin de buscar alternativas ante la problemática enunciada, es indispensable conocer las variaciones de la dinámica hídrica en zonas de llanura. Esto implica tener conocimiento de dos factores: los cambios en la precipitación (Maenza et al., 2017) y los cambios de cobertura y uso del suelo (Paruelo et al., 2005). No obstante, en la actualidad son pocos los estudios que detallan cómo los cambios de coberturas y usos del suelo inciden en las variables del balance hídrico en la región Pampeana.

En los últimos tiempos, cada vez ha sido más común el uso de imágenes satelitales para múltiples aplicaciones. Una de ellas y en la que ha resultado ser bastante eficiente, es en la caracterización de coberturas y usos del suelo a diferente escala espacio-temporal (Mas, 1999; Weng, 2002; Seto et al., 2002; Langner et al., 2007). Además, con imágenes NDVI-MODIS es posible reconocer las etapas del desarrollo vegetativo de las plantas (curvas fenológicas de crecimiento) (Lunetta et al., 2006; Guevara Ochoa et al., 2018) y, por lo tanto, el comportamiento anual de los cultivos, evidenciando la tendencia y evolución de las transformaciones en la superficie terrestre. En este sentido, las imágenes satelitales y su manejo a través de sistemas de información geográfica, son una herramienta fundamental en el desarrollo de este trabajo. Asimismo, a partir de imágenes satelitales es posible extraer información relevante para la generación de modelos hidrológicos, los cuales permiten evidenciar de forma cuantitativa el impacto de los cambios en el uso del suelo en los diferentes procesos del balance hídrico.

Es importante resaltar la relevancia de estudiar la dinámica hídrica en regiones como la Pampa Argentina, la cual se caracteriza por presentar alternancias a lo largo del tiempo de eventos hidrológicos extremos (inundaciones y sequías) que causan impactos sociales, económicos y ambientales; impactos que suelen agravarse de acuerdo a la magnitud de estos eventos (Scarpati y Capirolo, 2013). En este sentido, al cuantificar el balance hídrico para diferentes escenarios de usos del suelo, es posible contrastar la susceptibilidad de estos cambios ante la ocurrencia de inundaciones y sequías.

1.2 Antecedentes

En la zona de estudio, investigadores como Varni (2005), Cazenave y Vives (2014), Zeme et al. (2014), Vázquez et al. (2016), Fajardo y Entraigas (2017), Guevara Ochoa (2019), entre otros, han aportado conocimientos para entender mejor la dinámica hídrica en cuencas llanas. La cuenca del arroyo del Azul, es un ejemplo de un sistema hidrológico no típico (SHN) que por su bajo potencial morfológico predominan los movimientos verticales de agua (precipitación, evapotranspiración y recarga) sobre los horizontales (escurrimiento superficial) (Kovács, 1983). Según Varni (2005) y Guevara Ochoa (2019), aproximadamente el 85% del agua que precipita al año se pierde por evapotranspiración, el 10% recarga el acuífero y solo el 5% escurre superficialmente. La recarga

del acuífero está distribuida por áreas, es mayor en la parte alta de la cuenca y va decreciendo hacia la zona de menor gradiente (Usunoff et al. 1999). Además, en la parte alta de la cuenca existe una descarga local que va hacia el arroyo del Azul (Guevara Ochoa, 2019), ayudando al mantenimiento de los caudales superficiales. De modo que, conocer detalladamente la topografía de los paisajes llanos permite la correcta simulación de la dinámica del agua en estas zonas (Scioli, 2010), en donde la vulnerabilidad hídrica se ve incrementada, ya sea a mediano o a largo plazo, como consecuencia de las variaciones climáticas y por los cambios en el uso del suelo (Viglizzo et al., 1997; Santoni y López, 2013; Guevara Ochoa, 2019).

En primer lugar, el tema de las variaciones climáticas en la cuenca del arroyo del Azul, ha sido bastante estudiado (Vázquez et al., 2003; Ballari et al., 2009; Scian y Pierini, 2013; Cazenave y Vives, 2014; Guevara Ochoa, 2019; Fajardo y Entraigas, 2017), ya que esta zona suele estar expuesta a anegamientos periódicamente. Uno de los factores que influye en los excedentes superficiales, es la poca cobertura vegetal (Ares et al, 2012). De manera que, otoño e invierno son las temporadas del año más propensas a los anegamientos debido a la rotación de cultivos que suele dejar gran parte de los suelos descubiertos (Guevara Ochoa, 2019). Al encontrarse escasa vegetación para estos periodos, se favorece la formación de cuerpos intermitentes de agua en superficie, incidiendo notablemente en el balance hídrico de la cuenca (Usunoff et al. 1999). Ante este panorama, Vázquez et al. (2003) lograron identificar zonas con distintos grados de anegamiento en la cuenca del arroyo del Azul, posicionando las zonas de extensos bajos como la mayor superficie inundable, principalmente durante inviernos muy húmedos. Estos investigadores propusieron delimitar las zonas que presentan anegamientos frecuentes y relacionarlas con los tipos de suelos. De esta forma, se podría cuantificar el factor de riesgo de las prácticas agrícolas y a su vez, identificar áreas rurales más vulnerables y que requieran un manejo hidrológico-hidráulico. La recurrencia de inundaciones en la cuenca del arroyo del Azul, incentivó la búsqueda de soluciones mediante tecnologías que generen un mecanismo de alerta. Gracias a la participación técnica del Instituto de Hidrología de Llanura (IHLLA), se cuenta con 6 estaciones hidrometeorológicas que permiten cuantificar los aportes de precipitación y la evolución de los caudales del arroyo del Azul y sus afluentes (Cazenave y Vives, 2014).

En cuanto a los periodos secos, del año 1997 al 2007 se registraron alrededor de 500 días de emergencia por sequías en el partido de Azul (Ballari et al., 2009). Para el 2008, las precipitaciones disminuyeron aproximadamente un 50%, provocando un “Desastre agropecuario” a nivel nacional. Los efectos económicos en la cuenca del arroyo Del Azul fueron más adversos que cuando han ocurrido inundaciones, dado que la economía de esta cuenca se basa principalmente en la producción de cultivos de secano, los cuales suelen ser más susceptibles a las sequías (Guevara Ochoa, 2019). Algunos de los factores que aumentan los riesgos socioeconómicos en época de sequías, son los espacios forestales invadidos por vegetación seca, facilitando los incendios, la

disminución de caudales superficiales, la erosión del suelo por los efectos combinados de la reducción de la cubierta vegetal y la acción del viento (Samaniego y Bardossy, 2007). Según Varni y Weinzettel (2009), en verano el déficit hídrico en la zona de estudio es mayor por los elevados valores que alcanza la evapotranspiración, a pesar que esta época del año casi siempre tiene las mayores precipitaciones.

De acuerdo a Vázquez et al. (2016), para finales del 2006 el aumento de la rentabilidad de los cultivos de soja incentivó su expansión, logrando disminuir en un 20% la diversidad de cultivos en la cuenca del arroyo Del Azul. Para el 2016, Guevara Ochoa (2019) registró en la cuenca bajo estudio un aumento del 90% en cultivos de soja y de casi 45% en cultivos de maíz, mientras que la superficie sembrada con trigo y girasol se redujo un 30 y 80%, respectivamente.

Este proceso de agriculturización ha hecho que en los últimos años se use cada vez más la modelación hidrológica para cuantificar y analizar las alteraciones en los elementos atmosféricos del ciclo hidrológico. Uno de los modelos más usados en el mundo es el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), utilizado en una amplia gama de estudios hídricos e hidrológicos. Por ejemplo, Kraemer et al. (2011) fueron unos de los primeros en emplear el modelo SWAT en la Argentina usando datos reales, logrando simular el impacto del manejo del suelo en la producción de sedimentos en una microcuenca de la pampa ondulada, obteniendo resultados satisfactorios tanto a escala diaria como mensual. Asimismo, Troin et al. (2012) examinaron la capacidad de SWAT para adaptar su estructura a situaciones climáticas cambiantes, logrando analizar los impactos del clima y los cambios de cobertura en la regulación del flujo de agua en la laguna Mar Chiquita. Guevara Ochoa y Cazenave (2015), analizaron los extremos hídricos y la influencia que tienen los cambios en el uso del suelo y las prácticas de manejo de cultivo sobre el balance hídrico en la cuenca del arroyo santa catalina. Al analizar los resultados obtenido de 6 años (2006-2012) simulados con el modelo SWAT, estos investigadores presentaron una propuesta que logró reducir el escurrimiento superficial y aumentar la humedad del suelo, evidenciando una manera que hubiera logrado un menor impacto de las sequías e inundaciones para ese periodo.

A nivel mundial, el modelo SWAT también ha sido bastante usado para estudios hidrológicos. Algunos de estos trabajos es el de Ghaffari et al. (2010), quienes simularon los principales componentes del ciclo hidrológico en la cuenca Zanjanrood (noroeste de Irán) con el fin de estudiar los efectos de los cambios de uso del suelo en 1967, 1994 y 2007, obteniendo resultados bastante acertados que mostraron una respuesta hidrológica no lineal al sobrepastoreo y a la sustitución de pastizales y matorrales por agricultura de secano. Por otro lado, Hyandye et al. (2018) usaron el modelo SWAT para analizar la influencia de los cambios en el uso del suelo (del periodo 2013-2020) y del clima en un futuro cercano (2010-2039) en los procesos hidrológicos de la cuenca Ndembera

en Tanzania, concluyendo que las prácticas actuales de manejo del agua y del suelo tienen poco potencial para mitigar el impacto que tendrá el clima futuro en el recurso hídrico.

1.3 Hipótesis

El aumento de superficie sembrada con cultivos de secano ha provocado la reducción de coberturas naturales como los pastizales. Este tipo de transformaciones impacta en los procesos del balance hídrico, mayoritariamente en la escorrentía superficial y la recarga. Estas alteraciones hacen que los paisajes de llanura pierdan resiliencia ante eventos de inundaciones y sequías.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Cuantificar el balance hídrico a escala mensual y anual, bajo escenarios de cambios en el uso del suelo, para la cuenca superior del arroyo Del Azul.

1.4.2 Específicos

1. Elaborar mapas de uso del suelo a partir de imágenes satelitales para los periodos 2006-2007, 2010-2011 y 2015-2016 de la cuenca superior del arroyo del Azul.
2. Analizar las tendencias espacio-temporales de los cambios en el uso del suelo para la cuenca superior del arroyo del Azul.
3. Calibrar y validar el modelo hidrológico semidistribuido para la cuenca superior del arroyo del Azul.
4. Comparar los balances hídricos a escala anual y mensual generados por el modelo hidrológico para los periodos 2006-2007, 2010-2011 y 2015-2016.
5. Contrastar la susceptibilidad de los usos del suelo cuando se presentan eventos de extremos hídricos en la zona de estudio

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Hidrología de llanuras

La hidrología clásica se ha desarrollado bajo el concepto de cuenca hidrográfica convencional. En este tipo de cuencas puede definirse un área de aporte y existe una organización de la red de drenaje, logrando identificar cada uno de sus componentes y su orden de jerarquía. Son los denominados Sistemas Hidrológicos Típicos (SHT). Caso contrario ocurre en los paisajes llanos, los cuales son denominados Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHN) (Caamaño Nelli et al., 1979). La principal característica de estos paisajes es su baja pendiente, lo cual dificulta delimitar adecuadamente la red de drenaje y la superficie tributaria. Por lo general, la delimitación de la cuenca superficial y subterránea es muy diferente, dado que en estas áreas hay descarga de agua subterránea a escala local, intermedia y regional, conllevando a que la interacción entre aguas superficiales y subterráneas cambie a través de los diferentes sectores de la cuenca (Tóth, 1999). Cuando se presentan periodos de excesos hídricos, estas zonas responden en términos de acumulación (Zimmermann, 1999).

En la Tabla 2.1, se hace una comparación de las características de un paisaje con relieve (SHT) y un paisaje llano (SHN).

Tabla 2.1. Comparación de las características de los paisajes llanos y de los paisajes con relieve. Adaptado de Damiano et al. (1989).

ATRIBUTO	SHT	SHN
<i>Superficie tributaria (Cuenca)</i>	<i>Definida</i>	<i>No muy bien definida</i>
<i>Punto de descarga</i>	<i>Único</i>	<i>Múltiple</i>
<i>Energía morfológica</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>
<i>Drenaje superficial</i>	<i>Organizado y jerárquico</i>	<i>Anárquico</i>
<i>Flujo de agua horizontal</i>	<i>Predominantes</i>	<i>Minoritario</i>
<i>Flujo de agua vertical</i>	<i>Medio a poco importante</i>	<i>Determinantes</i>
<i>Pendiente superficial</i>	<i>Mayores a 0,5%</i>	<i>Menores a 0.1%</i>
<i>Impacto de la acción antrópica</i>	<i>Bajo a medio</i>	<i>Alto</i>
<i>Tiempo de respuesta a estímulo pluvial</i>	<i>Generalmente corto</i>	<i>Largo</i>
<i>Dirección de escurrimiento superficial</i>	<i>Invariable</i>	<i>Variable</i>

En los SHN predominan los flujos verticales de agua (precipitación, evapotranspiración y recarga) sobre los horizontales (escurrimiento superficial) a causa del bajo potencial morfométrico (Kovács, 1983). De acuerdo a Fuschini (1994), la dirección de la escorrentía superficial es demasiado versátil a causa de la constante dependencia de este flujo con la dirección del viento y la estructura del episodio lluvioso.

La escorrentía superficial se puede generar por dos procesos, por la intensidad de lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo en toda la cuenca causando el escurrimiento “Hortoniano” (Horton, 1933) o por la lluvia que cae sobre suelo saturado a causa del ascenso del nivel freático, originando el escurrimiento dunneano (Beven 1986).

En llanuras con pendientes menores al 1%, la capacidad para evacuar excesos hídricos y sales es bastante limitada (Toth, 1999). Esto ocurre porque el nivel freático suele encontrarse cercano a la superficie facilitando que los cuerpos de agua superficiales sean alimentados tanto superficial como subterráneamente de acuerdo a las condiciones de humedad (Kruse, 1992).

En días lluviosos el proceso de evapotranspiración comienza a actuar el mismo día, con algunas variaciones diurnas. Según Fuschini (1994), este proceso es la vía más importante para disminuir los anegamientos en las llanuras.

2.2 Extremos hídricos

Los extremos hídricos son condiciones del clima que se dan dentro de la variabilidad interanual de las precipitaciones. La frecuencia e intensidad de temporadas húmedas y secas puede desencadenar graves inundaciones o sequías. América es el continente con la población más vulnerable frente a estos extremos hídricos (United Nations, 1997). Además, el riesgo ante estos eventos naturales cada vez aumenta más y de forma proporcional al incremento de la población y la ocupación intensiva del territorio; por lo que las pérdidas socioeconómicas son mayores (Olcina, 2008). González et al. (2003) enumeró algunos de los impactos negativos que traen estos fenómenos naturales, destacando la reducción de agua potable, pérdida de cosechas, movilización de poblaciones y transporte de contaminantes. Adicionalmente, otros autores mencionaron la degradación y salinización de los suelos (Fuschini, 1994), reducción de fauna y flora terrestre (Knapp et al. 2008) y deterioro de la calidad del agua (Hutchins et al. 2018).

2.2.1 Inundaciones en zonas de llanura

El origen de las inundaciones en las llanuras es el exceso de lluvia o el ascenso del nivel freático. En general, por el bajo potencial morfométrico de estas zonas, el volumen de agua se extiende por muchas hectáreas con bajas velocidades de onda y tiempos de concentración largos (Kovács, 1983).

A pesar de que las inundaciones afectan a la población y al sistema agropecuario, también tienen efectos positivos en algunos ecosistemas y aspectos hidromorfológicos de los cuerpos de agua en las llanuras. Algunos de estos beneficios mencionados por Guevara Ochoa (2019), son la conservación y mejora de las funciones ecológicas de los ecosistemas (patrones de biodiversidad

de llanuras de inundación y humedales), aumento de microhábitats acuáticos, favorecen el crecimiento de especies nativas, regulan las fluctuaciones térmicas en superficie amortiguando las olas de calor y heladas, descomposición rápida de materia orgánica, entre otros.

2.2.2 Sequías

Las sequías son un fenómeno temporal, complejo y de lenta gestación que involucra aspectos meteorológicos, hidrológicos, ambientales y sociales (Ballari et al. 2009). Según la definición del Servicio Meteorológico Nacional, las sequías son consideradas como la deficiencia en el régimen de precipitación por un periodo prolongado de tiempo, impidiendo satisfacer las necesidades de los elementos bióticos de la región afectada.

Este fenómeno natural es difícilmente predecible, y de acuerdo a la intensidad, frecuencia de ocurrencia y vulnerabilidad de cada región, puede tener consecuencias más desfavorables que las causadas por las inundaciones (Wilhite y Glantz, 1985; Ballari et al. 2009). Aparicio (2007), enumeró algunos de los efectos negativos que traen las sequías a nivel social, sanitario, económico y ambiental. A nivel social destacó la obstrucción de los colectores de la red de alcantarillado urbano por falta de circulación de agua, incremento de las tasas de desempleo, reducción de la calidad de vida y cortes en el abastecimiento de agua potable. En cuanto a las consecuencias sanitarias, identificó la aparición de plagas y propagación de enfermedades contagiosas de tipo epidémico, vírico o gástrico, incremento de polvo en suspensión aumentando las enfermedades respiratorias, alérgicas e infecciosas y empleo de aguas residuales no depuradas para el riego agrícola. Los sectores económicos sufren grandes crisis por el deterioro de cosechas, reducción de la producción agrícola, disminución de cabezas de ganado, incrementando las importaciones, las cuales aumentan la inflación. A nivel ambiental, la escasez de agua produce superficies invadidas por pastos, matorrales y forraje extremadamente secos incrementando el riesgo de incendios, mortandad de especies acuícolas y reducción de la cubierta vegetal aumentando la erosión del suelo por acción eólica.

En la Figura 2.1, se muestra la secuencia de evolución de los diferentes tipos de sequías. Estas pueden ser, sequías meteorológicas, sequías agrícolas, sequías hidrológicas y sequías socioeconómicas (Wilhite y Glantz, 1985).

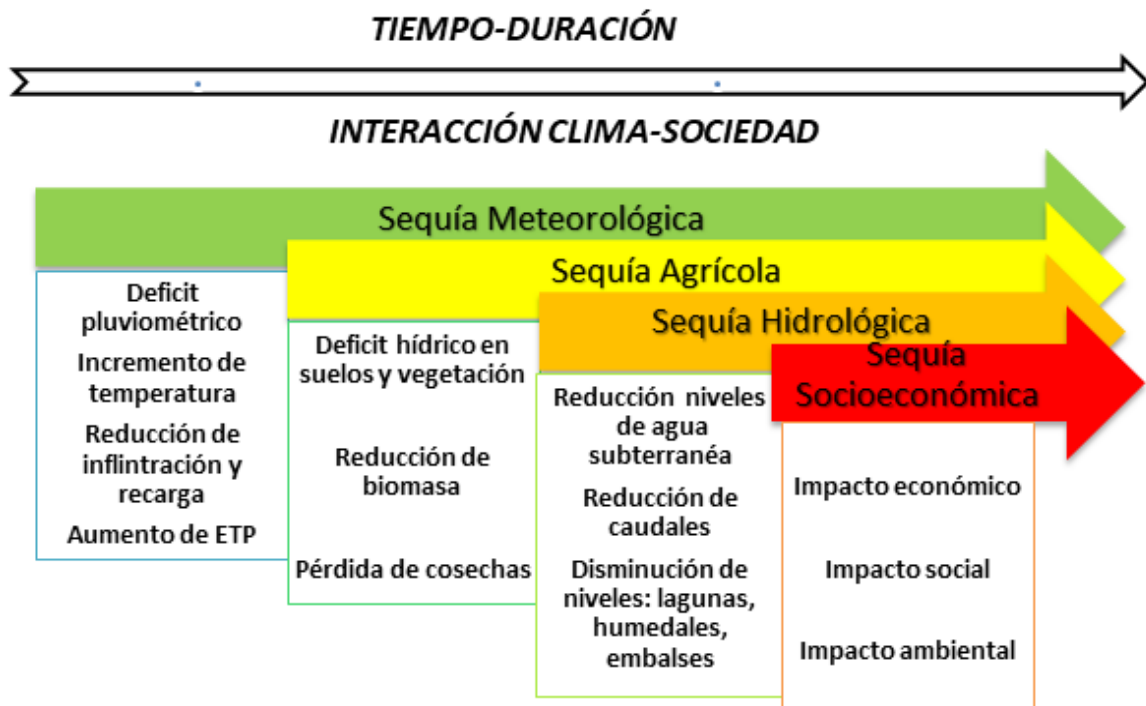


Figura 2.1. Secuencia evolutiva de los diferentes tipos de sequías. Adaptado de Guevara Ochoa (2019)

- Sequía meteorológica: Generalmente dura de meses a años durante los cuales el aporte de humedad disminuye progresivamente debido al déficit pluviométrico. Este tipo de sequía es causada por anomalías persistentes en los patrones de circulación atmosférica a gran escala que a menudo se desencadenan por temperaturas anómalas en la superficie del mar tropical.
- Sequía agrícola: Este tipo de sequía se presenta cuando disminuye la humedad del suelo reduciendo la producción agrícola en cualquiera de sus fases de crecimiento.
- Sequía hidrológica: ocurre cuando disminuyen las reservas de agua disponibles en acuíferos, ríos y lagos a causa de la disminución de la precipitación por debajo de la media estadística. Este tipo de sequía tiene un desfase temporal más largo que puede demorarse durante meses luego del inicio del descenso pluviométrico y dependiendo del volumen de agua que tenga almacenado el sistema subterráneo.
- Sequía socioeconómica: se produce cuando la disponibilidad de agua decrece hasta el punto de producir daños a una población o a su economía.

2.3 Modelos matemáticos para la evaluación hidrológica

Según Estrela (1993), los modelos matemáticos se han utilizado ampliamente para la simulación, análisis y control de recursos hídricos y de sistemas hidrológicos. Asimismo, este autor define los sistemas hidrológicos como una serie de procesos físicos, químicos o biológicos que actúan sobre

variables de entrada para convertirlas en variables de salida. En los modelos matemáticos hidrológicos, el comportamiento del sistema es representado por ecuaciones que expresan la relación entre variables y parámetros; siendo una variable toda característica cuantificable del sistema, que asume distintos valores numéricos en tiempos diferentes. En cambio, un parámetro es una característica cuantificable que permanece constante (Aranda, 2015)

Los modelos matemáticos pueden dividirse en dos grandes grupos, determinísticos y estocásticos (Estrela, 1993). En los modelos determinísticos, las variables vienen establecidas por leyes físicas que explican toda su variabilidad. Este modelo suele ser el más usado por los hidrólogos para la evaluación de recursos hídricos, porque permite reflejar los procesos esenciales del ciclo hidrológico en su fase terrestre (Aranda, 2015). Además, estos modelos tienen mayor potencial que los modelos estocásticos en simular aportaciones en cuencas no aforadas, dada la posible relación de sus parámetros con las características físicas de las cuencas (Sing y Frevert, 2006).

La implementación de cualquier modelo determinístico consta de las siguientes etapas:

- 1) **Formación de un modelo conceptual:** se plantean la o las posibles hipótesis del movimiento del agua basadas en los datos disponibles y en las ideas existentes de sistemas similares
- 2) **Construcción del modelo:** se formulan las ecuaciones que describen los distintos procesos que tienen lugar en el modelo conceptual planteado.
- 3) **Calibración de los parámetros del modelo:** etapa del proceso de modelización que busca asegurar que todos los datos disponibles (variables y parámetros) son cualitativa y cuantitativamente compatibles. Además, la calibración suele utilizarse para dar valores numéricos a aquellos parámetros que disponen de pocos o ningún dato. La etapa calibración es indispensable para determinar la fiabilidad de los resultados.
- 4) **Validación del modelo:** consiste en comprobar el adecuado funcionamiento del modelo con observaciones no utilizadas en el proceso de calibración.
- 5) **Análisis de sensibilidad del modelo:** en esta fase se determina cómo varían los resultados proporcionados por el modelo con pequeñas variaciones del conjunto de parámetros calibrado. De esta forma se pueden tener en cuenta las incertidumbres existentes.

Dentro de los modelos matemáticos determinísticos, los más utilizados son los modelos de simulación continua, los cuales simulan el ciclo hidrológico en su fase terrestre, completo y de forma continua en el tiempo, estableciendo balances de humedad entre los distintos procesos que ocurren desde que inicia la precipitación (Sing y Frevert, 2006). Existen tres tipos de modelos de simulación continua: agregados, semidistribuidos y distribuidos (Estrela, 1993).

Los modelos agregados consideran toda el área de estudio de forma conjunta, caracterizándola con los valores promediados de los parámetros y variables. Esto genera uniformidad en la cuenca debido a que cada parámetro tiene un único valor. Por lo tanto, la respuesta del modelo representa el funcionamiento global del sistema. Estos modelos se basan en el establecimiento de balances de humedad entre las distintas zonas de almacenamiento.

Los modelos semidistribuidos se caracterizan porque dividen la cuenca en múltiples subcuencas y unidades de respuesta hidrológica (URH). Las diferentes URH generan sus propias salidas de forma desagregada y luego se unen para conformar la respuesta del sistema completo.

Los modelos distribuidos dividen el área de estudio en porciones (celdas o grillas) y en cada una de ellas calcula el balance hídrico.

Por su parte, en los modelos (matemáticos) estocásticos, las variables son regidas por leyes del azar y, por tanto, caracterizadas en términos de probabilidad (Estrela, 1993). Tienen su fundamento en el máximo aprovechamiento de la información que ofrecen las muestras. Son generalmente lineales y están muy limitados en cuanto a la representación de los procesos hidrológicos.

En la actualidad existen muchos tipos de modelos hidrológicos, siendo la diferencia fundamental entre ellos el grado de detalle con que tratan cada uno de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico (Aranda, 2015).

CAPÍTULO 3: ZONA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación

La cuenca superior del arroyo del Azul (CSAA) (Figura 3.1) está ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, abarcando un área superficial de 1026 km². Al norte limita con la ciudad de Azul, al oeste con la ciudad de Olavarría, al este con la ciudad de Tandil y al sur con la ciudad de Chillar. La cuenca nace en la localidad de Chillar (60 km al sur de la ciudad de Azul) y sus principales afluentes son el arroyo Videla (120 km²) y el arroyo Santa Catalina (138 km²). La máxima elevación en la cuenca es de 366,7 msnm y la mínima es de 142,3 msnm. El sistema de Tandilia, ubicado al SE de la cuenca, es un sector de sierras con pendientes mayores al 6%. A medida que avanza hacia el NO, el sistema de sierras se va transformando en una llanura de transición con un área de ondulaciones en su parte media, donde predominan las pendientes de 3-6%. En la parte baja se presenta un sector de llanuras con pendientes que oscilan entre 1-3%.

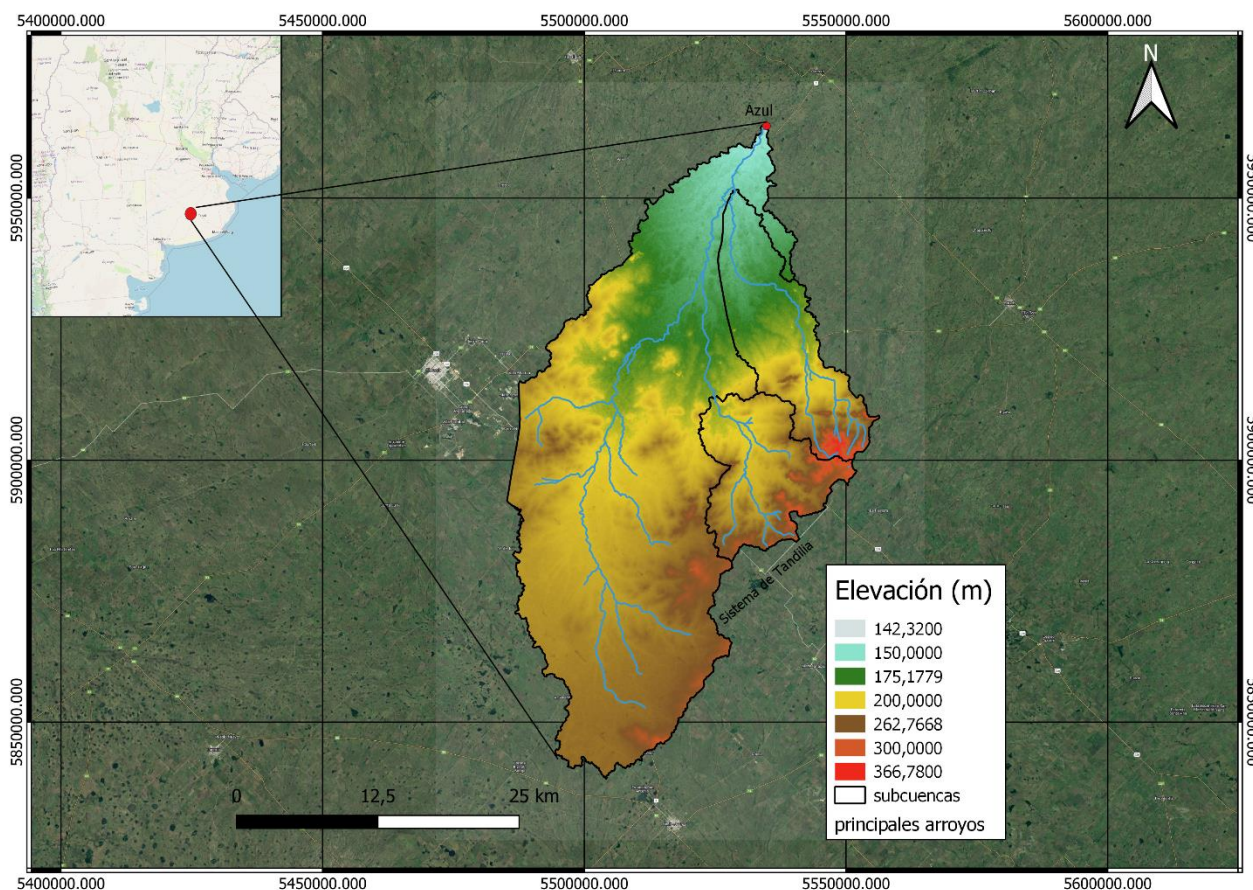


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la cuenca superior del arroyo Del Azul.

3.2 Clima

Según la clasificación climática de Thornthwaite (1948), el clima del partido de Azul es subhúmedo-húmedo, mesotermal, con influencia oceánica y con poca o nula deficiencia de agua. Se presentan inviernos suaves y veranos cortos y frescos, con alta humedad en todas las estaciones. De acuerdo a la información de la estación Azul Aero del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para el periodo de 1981-2010, la temperatura media anual para la localidad de Azul fue de 15,5°C, con la máxima promedio mensual en enero de 29°C y la mínima promedio mensual en junio-julio de 2°C. La precipitación promedio anual registrada en la estación Azul, fue de aproximadamente 900 mm, sobresaliendo el mes de marzo por ser el más lluvioso con un promedio de 123 mm. Los meses de junio y julio registraron el menor aporte pluviométrico con 34,3 mm. La distribución de la precipitación media anual en la CSAA no es uniforme; en la Figura 3.2, se muestra que en la zona noreste y sureste las lluvias tienden a ser más abundantes que en la parte central de la cuenca con diferencias de aproximadamente 57,3 mm (Guevara Ochoa et al., 2017).

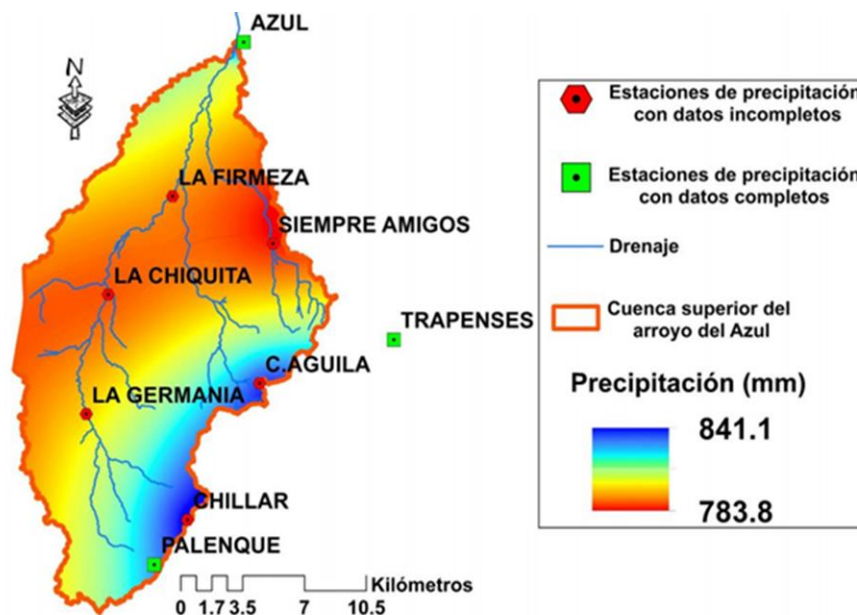


Figura 3.2. Distribución espacial de la precipitación promedio anual para el periodo 2006-2014 en la cuenca superior del arroyo del Azul. Tomado de (Guevara Ochoa et al., 2017)

3.3 Geología

La zona de estudio se encuentra entre dos ecorregiones: el complejo de Sierras Bonaerenses en el dominio serrano (Tandilia) al sureste, y la Pampa Deprimida al noroeste de la provincia. Desde el punto de vista morfoestructural, la cuenca está ubicada en los ámbitos del sistema de Tandilia y la cuenca tectónica del Salado (Zárate y Mehl, 2010). El límite entre ambas unidades morfoestructurales está determinado por la prolongación hacia el noreste de la costa de Heusser,

que según Teruggi y Kilmurray (1975), corresponde a una línea de escarpe de falla de erosión retrocedente. Como se muestra en la Figura 3.3, en la cabecera de la sierra de Tandilia aflora la unidad más antigua de la CSAA. Esta unidad es un basamento cristalino del precámbrico, compuesto por rocas metamórficas, cuarcitas, tonalitas y migmatitas que se van profundizando progresivamente hacia el norte de la cuenca, constituyendo el límite inferior del acuífero freático que alcanza una profundidad de 120m (Bucich y Fernández, 1993; Varni, 2005). En la parte media y baja de la cuenca, sobre la planicie de agradación, el basamento cristalino es cubierto por un complejo sedimentario permeable, con porosidad primaria, de edad cenozoica (Kruse, 1992) compuesto por depósitos de gravas, cuarzo-areniscas y limos periserranos (formación Balcarce). Más hacia el norte, se depositan sedimentos de grano medio a fino de arenas arcillo-limosas y limos areno-arcillosos con buena permeabilidad y de origen eólico con algunos aportes volcánicos. Esta unidad del cuaternario fue depositada a finales del Holoceno (Tricart, 1973) y puede alcanzar de 3 a 4 m de espesor con algunas concreciones calcáreas (Kruse, 1992).

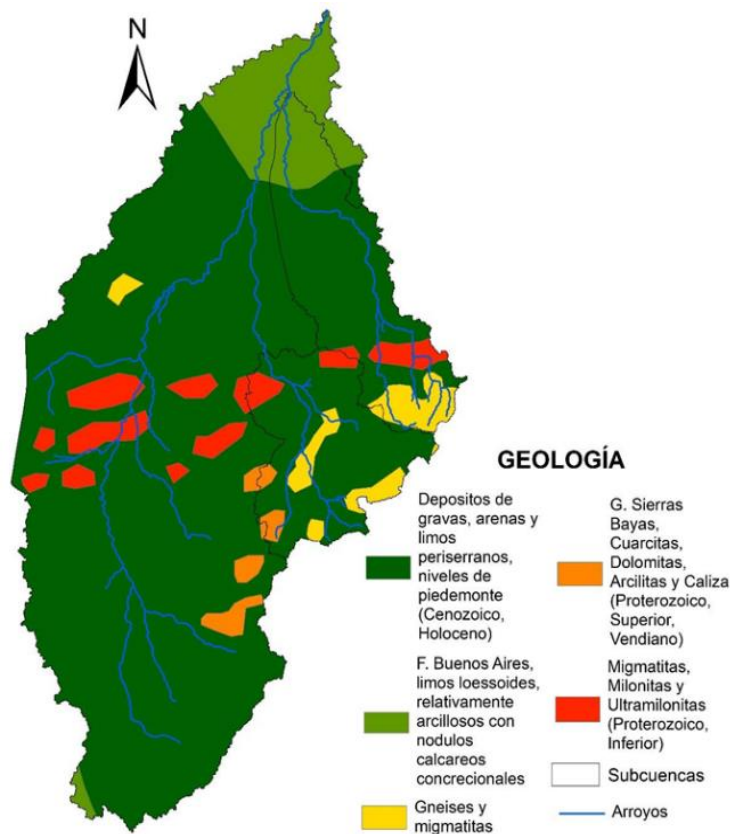


Figura 3.3. Mapa geológico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Tomado de Rimoldi y Soriano (1999)

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente la CSAA se puede dividir en dos dominios: serrano y extraserrano (Figura 3.4) (Zárate y Mehl, 2010). El dominio serrano (DS), abarca el afloramiento rocoso de la serranía de Tandilia y sugiere un paisaje longevo por sus formas suaves, con cimas aplanadas y alturas relativamente constantes. Este dominio se subdivide geomorfológicamente en áreas de interfluvios y valles fluviales.

El dominio extraserrano (DES), se encuentra hacia el noreste de los afloramientos y se caracteriza por su extensa planicie con relieves muy suaves que abarca la mayor parte de la CSAA. Este dominio ha sido subdividido por su geomorfología en tres áreas principales: 1) planicie de agradación con costras calcáreas estratiforme (PAC), 2) planicie de agradación con cubierta eólica dominante (PAE) y 3) planicie de agradación aluvial o abanico distal (PAA); los límites entre las tres áreas son transicionales (Zárate y Mehl, 2010). En este dominio se pueden encontrar unidades geomorfológicas como las dunas longitudinales que atraviesan las tres áreas del DES, dunas parabólicas que ayudan a controlar el drenaje, canales de drenaje que interconectan sectores bajos del paisaje y cubetas de deflación distribuidas por todo el DES. Según Tricart (1973), las cubetas de deflación se formaron por los procesos eólicos que actuaron durante el paleoclima árido del Cuaternario. Estas cubetas aportan varios servicios ecosistémicos, sobre todo en épocas de inundación donde funcionan como pequeños reservorios regulando los excesos hídricos.

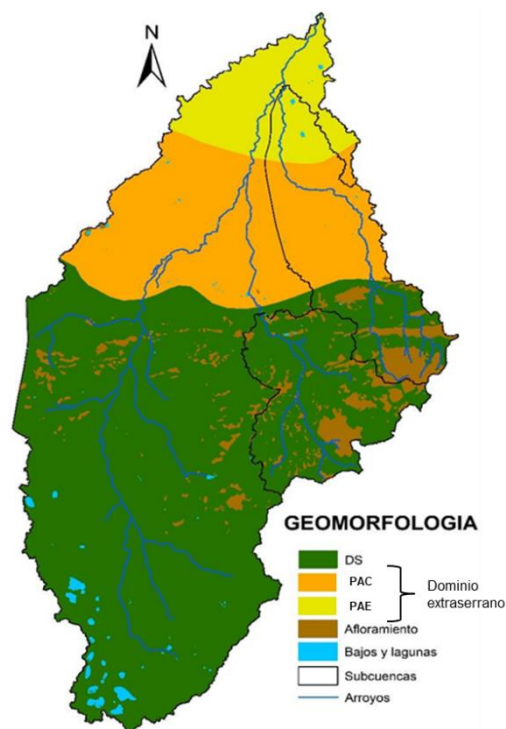


Figura 3.4. Mapa geomorfológico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. DS: Dominio serrano, PAE: Planicie de agradación con cubierta eólica dominante, PAC: Planicie de agradación con costras calcáreas estratiformes. Adaptado de Zárate y Mehl (2010).

3.5 Hidrología e hidrogeología

La CSAA posee un escurrimiento superficial que se desplaza desde la cuenca alta (SE) hacia la cuenca baja (NO). La dinámica hídrica de la cuenca, tiene un comportamiento particular según la zona en que se analice: Al SE, en las zonas de serranías, la divisoria de agua está bien definida, los cauces principales tienen una tendencia subdendrítica y el escurrimiento superficial es de tipo encauzado. A medida que el curso principal y sus tributarios ingresan en la planicie distal, el escurrimiento se torna de tipo mantiforme y se desplaza paralelo al arroyo en consecuencia con la disminución de la densidad del drenaje y la pendiente (<1%).

En los periodos de excesos hídricos, el escurrimiento superficial en la zona de serranía logra alimentar los cauces de los arroyos principales. En cambio, la respuesta en las zonas de baja pendiente, donde la dirección de escurrimiento superficial es variable y no hay una red de drenaje establecida, la lámina de agua fluye con baja energía cubriendo grandes superficies con poca profundidad, generando anegamientos durante largos periodos de tiempo, aumentando la tasa de evapotranspiración y la interacción entre las aguas superficiales y las subterráneas (Fajardo y Entraigas, 2017).

El basamento cristalino que aflora en la zona de serranías, se considera como la unidad acuífuga basal del sistema hidrogeológico y, los sedimentos pampeanos depositados encima del basamento cristalino contienen el acuífero pampeano (Varni, 2005). El complejo de rocas acuíferas, está constituido por las unidades geológicas cuaternarias Pampeano y Postpampeano correspondientes a la sección hidrogeológica epiparaniana (Sala et al., 1987)

El flujo de agua subterránea, al igual que el flujo de agua superficial, se mueve desde el sistema de Tandilia (SE) hacia el noreste de la cuenca. Debido a los altos gradientes hidráulicos de la zona SE, el flujo de agua subterránea local tiende a descargar al arroyo del Azul, permitiendo definir la misma divisoria de agua superficial y subterránea (Guevara Ochoa, 2019). Caso contrario ocurre hacia el norte de la cuenca, donde hay un bajo gradiente hidráulico y el flujo de agua subterránea transcurre paralelamente al arroyo, por lo que la delimitación de la cuenca subterránea no coincide con la cuenca superficial. De acuerdo a Varni y Usunoff (1999), la variación espacial de la evapotranspiración de referencia en la CSAA es muy baja y, por lo tanto, también es baja la variación espacial de la evapotranspiración potencial. Según los investigadores anteriormente citados, los periodos de mayor recarga son los meses de marzo a junio (otoño), siendo enero la época de menor recarga.

3.6 Tipos de suelo

A continuación, se describen brevemente los grupos de suelos presentes en la zona de estudio.

Argiudoles: suelos con horizonte A profundo, rico en materia orgánica, buena saturación con bases (mayor del 50%) y bien estructurado. Poseen un horizonte argílico, desarrollado por lixiviación, que se reconoce por la presencia de barnices. El régimen de humedad del suelo es típico de climas húmedos, pudiendo tener períodos secos de escasa intensidad. Los típicos no tienen ningún tipo de limitación, por lo que en ellos se desarrolla la mayor parte de la actividad agrícola; mientras que, en el caso particular de los líticos, la roca se encuentra dentro de los primeros 50 cm. En la zona de estudio predominan los Argiudoles típicos.

Hapludoles: suelos con régimen údico de humedad, sin horizonte argílico, mullidos, blandos, con un horizonte superior moderadamente provisto de materia orgánica, con estructura débil, susceptible a la erosión eólica y excesivamente permeable. En el caso particular de los líticos, sólo constan de un horizonte A, el cual está en contacto con el sustrato consolidado que limita la profundidad del suelo, impidiendo la normal percolación del agua y la exploración radicular.

Natracuoles: suelos con drenaje deficiente, con períodos de saturación y ambiente reductor. Con horizonte nátrico caracterizado por poseer más del 15% de sodio intercambiable, PH mayor de 8.5 desde la superficie, tienen generalmente una estructura columnar, acumulación de arcillas y materia orgánica dispersada (muy móvil). Poseen un horizonte oscuro, profundo, rico en bases y alto contenido de material orgánico (epipedón mólico).

Natracualfes: suelos con drenaje deficiente, en algún momento del año están saturados y presentan un ambiente reductor. Presencia de horizontes argílico y nátrico. En el caso de los mólicos, el horizonte de superficie es oscuro, profundo, rico en bases y alto contenido de material orgánico.

Paleudoles: suelos profundos, con un horizonte de alto contenido de arcilla que decrece muy poco con la profundidad. Son muy evolucionados, tienen horizonte argílico y, en esta zona, presentan una capa de cementación dentro del metro de profundidad.

3.7 Cobertura vegetal

Las características topográficas y las propiedades edáficas de los paisajes deprimidos interactúan entre sí y varían espacialmente conformando un paisaje con una distribución particular de la vegetación (Zeme et al., 2014). Entre la vegetación nativa dominante en la parte interserrana de la cuenca superior, se encuentran pastizales del género *Nasella* (*N. neesiana*, *N. trichotoma*, *N. tenuis*) y en la parte serrana, *Paspalum quadrifarium* o hierbas del género *Eryngium*. También se

desarrollan arbustales bajos como *Colletia paradoxa*, *Baccharis tandilensis* y árboles como *Eucaliptus camaldulensis*, *Salix fragilis-humboltiana* y especies del género *Populus* como el álamo.

La zona de estudio presenta las comunidades tradicionales de la Pampa Deprimida, como los pajonales de paja colorada (Vervoorst, 1967 y Lara, 2016). La disposición de la cobertura vegetal en la cuenca del arroyo del Azul está determinada directamente por el reemplazo de este pajonal (Lara, 2016).

El pajonal es una comunidad donde domina la gramínea *Paspalum quadrifarium* o paja colorada, que crece en terrenos húmedos, formando pajonales muy densos de hasta 1,8 m de altura y, por consiguiente, un refugio para la fauna típica de la Pampa deprimida. Su actividad vegetativa es en el periodo estivo-otoñal y es capaz de mantener altas acumulaciones de biomasa durante todo el año. No obstante, su extensión se ha reducido progresivamente por efecto del arado y por la quema no controlada (Lattera, 2003).

De acuerdo a los resultados de las estimaciones agrícolas de la secretaría de agroindustria de la nación, campaña 2017-2018, la superficie bajo cultivo en el Partido de Azul es aproximadamente 304.813 hectáreas, de las cuales 279.775 ha corresponden a cultivos anuales como, trigo, cebada, maíz, soja y girasol, y 25.038 ha a pasturas perennes. Del total de la superficie con cobertura vegetal, el 92% está destinada a cultivos anuales y 8% a pasturas que suelen ser parte del sistema de rotación de cultivo. (Figura 3.5).

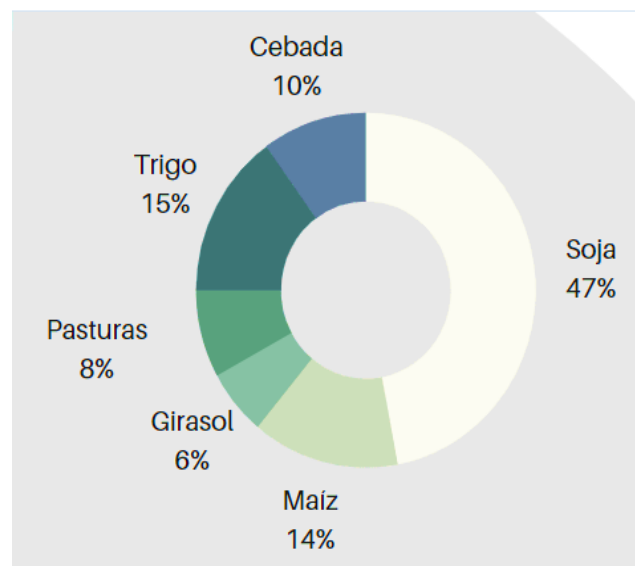


Figura 3.5. Superficie cultivada en el partido de Azul. Cosecha 2017-2018

Todos los cultivos anuales se realizan bajo la modalidad de siembra directa, es decir la no labranza del suelo. Adoptar esta técnica tiene beneficios como, disminuir los costos y el tiempo operativo, mejorar el aprovechamiento del agua, prolongar el ciclo agrícola, mayor estabilidad de los rendimientos, reducción de la maquinaria utilizada, lo cual hace que disminuya el uso de combustible permitiendo obtener un 25% a 40% más de rendimiento en los cultivos (INTA, 2011)

Los cultivos de climas templados y fríos, como el trigo y la cebada, inician su ciclo vegetativo en invierno, terminando el ciclo en verano. Los cultivos invernales, principalmente el trigo, aporta numerosos beneficios como el control de malezas, incremento de la fertilidad del suelo, fijación de carbono en el suelo, aporta rastrojo abundante, mejora la estabilidad del suelo y favorece la actividad biológica al incorporar mayor peso de raíces por unidad de superficie que el maíz o la soja (Álvarez, 2006).

La siembra de maíz se realiza en primavera (a fines de septiembre) por el alto nivel de respuesta de la planta a los efectos de la luz, cuyo ciclo de producción va desde los 60 días hasta los 10 meses. No presenta enfermedades sanitarias graves y necesitan de suelos profundos con elevada capacidad de retención de agua (Eyhérbide 2012). Cuando se presenta una sequía durante las primeras etapas de crecimiento del maíz (15 a 30 días), puede ocasionarse una pérdida de plantas jóvenes, reduciendo así la densidad poblacional o estancar su crecimiento. Cerca de la floración, el maíz es muy sensible al estrés hídrico, y el rendimiento del grano puede ser afectado si se produce una sequía. En general, el maíz necesita por lo menos de 500 a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo del cultivo, pero es muy sensible a los suelos saturados o sobresaturados (Arriaga, 1987).

La planta de girasol, por el contrario, se adapta a una amplia variedad de suelos, alcanzando su máximo potencial cuando se siembra en suelos profundos, bien drenados y con alta capacidad de retención de agua. La época de siembra es en primavera-invierno y requiere entre 500 y 550 mm de agua (Andrade, 1995). El girasol extrae, en profundidad, más agua que el maíz o la soja, puesto que consume casi la mitad de la cantidad total de agua necesaria hasta alcanzar su máximo rendimiento potencial. Una vez culmina el proceso de crecimiento activo, el girasol es una de las plantas más resistentes a las sequías.

La siembra de soja se realiza en primavera-verano y su ciclo vegetativo oscila de 3 a 7 meses. Se desarrolla entre los 20 y 30° C, siendo las temperaturas más cálidas las ideales para su óptimo desarrollo. Sin embargo, es capaz de resistir heladas de -2 a -4° C sin morir y es bastante resistente a las sequías. La soja necesita al menos 300 mm de agua y se puede sembrar en suelos bajo en nutrientes, por lo que a menudo se emplea como alternativa para aquellos terrenos poco fertilizados (INTA, 2011). Esta leguminosa es sensible a los anegamientos, resistente a la salinidad y fijadora

de nitrógeno, gracias a la simbiosis que tiene con las bacterias en sus raíces. Por ello, la soja puede sembrarse como segunda cosecha después de un cereal de invierno y el nitrógeno que proporciona ayuda a la germinación y posterior desarrollo de los trigos sembrados en otoño. La planta de soja es poco agresiva y por lo tanto vulnerable a las malezas durante la fase inicial de su desarrollo (Andrade, 1995). Por lo tanto, para poder garantizar la calidad final del producto es necesario emplear técnicas para el control de malezas, ya sean controles mecánicos o químicos.

Normalmente, a fines de verano y comienzos de otoño, se dan las condiciones ambientales de temperatura y humedad favorables para la siembra de pasturas perennes (INTA, 2011). Estas pasturas tienen un rol importante en la rotación con cultivos anuales, ya que permiten fijar nitrógeno biológicamente ahorrando grandes cantidades de gas u otros combustibles fósiles. También ayudan a aumentar la infiltración y la materia orgánica profunda por efecto de sus raíces, mejorar el control de plagas agrícolas y aumentar la captación de carbono ayudando a mitigar el impacto del cambio climático (Milano, 2009).

CAPÍTULO 4: MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se especifican los materiales y metodologías empleadas para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo. En primer lugar, se detalla la metodología usada para la elaboración de los mapas de coberturas y usos del suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul; información fundamental para analizar los cambios en el balance hídrico de la cuenca. En segundo lugar, se describe el modelo usado para cuantificar espacial y temporalmente los procesos hidrológicos en la cuenca superior del arroyo Del Azul, detallando la información de entrada que necesita el modelo, el análisis de sensibilidad de los parámetros, la calibración de los parámetros más sensibles y finalmente, la validación del modelo.

4.1 Generación de mapas de usos del suelo

Se elaboraron tres mapas de usos del suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul para los periodos 2006-2007, 2010-2011 y 2015-2016. Cada mapa representa un escenario a analizar, por lo que al mapa del periodo 2006-2007 se denominó escenario P1 o de línea base, el mapa del periodo 2010-2011, corresponde al escenario P2 y el mapa del periodo 2015-2016, es el escenario P3. Cada mapa se ha expresado en el sistema de referencia de coordenadas (SRC) EPSG:5347 POSGAR 2007, Argentina faja 5 y se generaron siguiendo la metodología para la caracterización del uso del suelo (mediante la fusión de imágenes de media resolución espacial) propuesta por Guevara Ochoa et al. (2018), la cual se describe a continuación.

4.1.1 Imágenes satelitales

A partir de dos fuentes de imágenes satelitales de media resolución espacial, correspondientes al sensor MODIS-Terra y los satélites LANDSAT 7 y 8, se elaboraron los tres mapas de usos del suelo. Estas imágenes fueron proporcionadas por el sitio web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). En primero lugar, se utilizó una serie temporal de 23 imágenes NDVI-MODIS del producto MOD13Q1, escena h13v12, con una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días. Para cada periodo analizado, las imágenes abarcaron un año de datos, iniciando en el mes de mayo y finalizando en mayo del siguiente año con el fin de obtener información de las etapas fenológicas de las coberturas en el hemisferio sur. Es decir, este desajuste en el año calendario, permite apreciar las primeras etapas de crecimiento de cultivos de invierno como el trigo y el fin de la cosecha de los cultivos de verano como soja y maíz. Asimismo, para cada periodo analizado se emplearon dos imágenes, una de invierno y otra de verano, de los satélites LANDSAT-7(escenarios P1 y P2) y LANDSAT 8 (escenario P3). Las imágenes LANDSAT 8, con una combinación de bandas RGB 7, 6, 4, hacen posible atravesar partículas atmosféricas, humo y neblina. Además, se usaron solo las bandas reflectivas con resolución espacial de 30 m (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y dos bandas de infrarrojo medio). Las bandas térmicas fueron

descartadas debido a que las coberturas a identificar tienen un rango dinámico mayor en las bandas reflectivas y no en las bandas térmicas (Lara y Gandini, 2014). Como las imágenes LANDSAT-8 se encuentran a partir del año 2013, para los periodos 2006-2007 y 2010-2011, se hizo la identificación de áreas misceláneas (bajos y lagunas, afloramientos rocosos y montes) a partir de 4 imágenes Landsat 7 con una serie de imágenes históricas de alta resolución.

4.1.2 Clasificación y obtención de coberturas del suelo

Se realizó una clasificación no supervisada a partir de la serie temporal de imágenes NDVI-MODIS con el algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis). Este algoritmo es un método de agrupamiento que realiza un proceso iterativo en el que a los grupos o clusters, previamente definidos según los parámetros establecidos, se les asigna una media arbitraria dentro del espacio de n-dimensiones, utilizando técnicas de mínima distancia, en términos de distancia euclidiana. En cada iteración las medias o centroides se recalculan y los píxeles se reclasifican con respecto a los nuevos centroides. De esta manera, el proceso de agrupamiento continúa hasta alcanzar la cantidad máxima de iteraciones, el umbral de tolerancia y la desviación estándar máxima. Inicialmente, este trabajo se configuró con un máximo de 50 iteraciones, 5% de umbral de tolerancia y desviación estándar máxima de 1. De este modo, se generaron 15 clases de curvas estacionales para los escenarios P1 y P2, y 14 clases para el escenario P3. Una vez generadas las clases, se obtuvo el valor medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) para cada una de las 23 fechas en que se adquirieron las imágenes utilizadas.

El NDVI se calcula utilizando la radiación reflejada por la vegetación en el rango visible e infrarrojo del espectro electromagnético. Este índice se define como la diferencia entre las reflectancias medidas en el rojo (ρ_{red}) y en el infrarrojo cercano (ρ_{nir}) normalizada por la suma de ambas (ecuación 4.1)

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (4.1)$$

El índice NDVI permite monitorear cambios estacionales e interanuales tanto en la actividad como en el crecimiento de la vegetación. Es importante tener en cuenta que con esta metodología es necesario tener un conocimiento previo del comportamiento estacional de los cultivos en la zona de estudio, con el fin de poder asociar cada cultivo a las diferentes firmas fenológicas. En la Tabla 4.1 se presenta una breve descripción de cada cobertura y uso del suelo presentes en la CSAA.

Tabla 4.1. Descripción de las coberturas y usos del suelo presentes en la cuenca superior del arroyo Del Azul.

Cobertura	Descripción
Soja (SJ)	Legumbre de ciclo anual. Normalmente sembrada en octubre-noviembre. Cultivo de primavera-verano.
Trigo-soja (TRSJ)	Sistema de doble cultivo. Precediendo la cosecha de trigo, la soja (soja de segunda fecha) se siembra a partir del mes de diciembre en un mismo modulo de rotación anual.
Maíz (MZ)	Cereal de producción anual. Cultivo de primavera-verano
Cultivos de invierno (CINV)	Cultivos anuales como la cebada y el trigo
Girasol (GS)	Planta oleaginosa anual. Cultivo de primavera-verano
Pasturas y pastizales naturales (PPN)	Las pasturas suelen ser parte del sistema de rotación de cultivos. Donde los suelos no son propicios para los cultivos es común encontrar pastizales naturales
Montes (MNT)	Zonas pobladas de árboles y/o arbustos
Roca (R)	Afloramientos rocosos principalmente de roca cristalina
Bajos y lagunas (BL)	Lagunas permanentes o semipermanentes. También conformado por bajos anegables

Para diferenciar entre cultivos, se agruparon las firmas fenológicas según su patrón de crecimiento y desarrollo a lo largo del año. De esta forma, se clasificó como soja a las curvas unimodales con valores máximos de NDVI en febrero-marzo, y como maíz a las curvas con un patrón similar, pero alcanzando los máximos valores de NDVI en enero y febrero. Las curvas que presentaron un máximo de NDVI a finales de la época invernal, septiembre-octubre, se clasificaron como cultivos de invierno. Si la firma fenológica además de tener el mismo comportamiento del cultivo de invierno presentó otro valor máximo de NDVI en febrero, se clasificó como sistema de doble cultivo trigo-soja. Asimismo, los cultivos que mostraron un patrón de crecimiento a mediados de octubre, alcanzando un máximo desarrollo fenológico en diciembre-enero, se denominó como girasol. Por otro lado, las clases que no presentaron un patrón promedio unimodal o bimodal, se clasificaron como pasturas y pastizales naturales y áreas misceláneas. Las pasturas y pastizales naturales, se caracterizaron por mantener un valor promedio de NDVI mayor a 0,4 a lo largo de la estación de crecimiento. Por otro lado, las áreas misceláneas corresponden a un valor promedio anual de NDVI menor a 0,4. En la Figura 4.1, se muestran las firmas fenológicas representativas de las diferentes coberturas analizadas. Una vez clasificados los usos del suelo por cada producto satelital, se fusionaron las dos fuentes de datos satelitales para obtener los mapas finales de cobertura y usos del suelo de la CSAA.

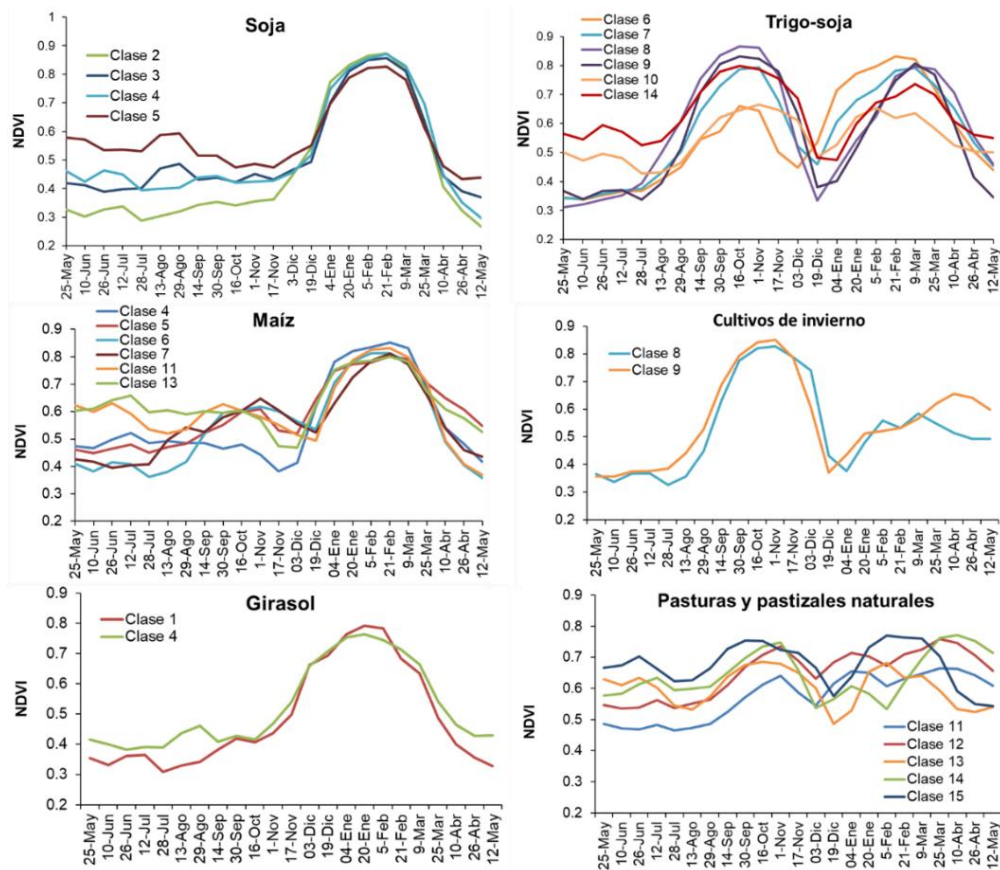


Figura 4.1. Curvas estacionales del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para cada una de las 15 clases resultantes.

4.1.3 Validación

Una vez elaborados los mapas de usos del suelo para los tres periodos, se midió su fiabilidad validando los resultados obtenidos. La validación se realizó a partir de matrices de confusión calculadas con el software ENVI 4.7. Este método se basa en comparar los píxeles que han sido clasificados en las distintas categorías con un conjunto de datos de validación obtenidos en campo u otras fuentes confiables.

La estructura de la matriz es de tipo cuadrada, donde las columnas indican las categorías de referencia, y en las filas se encuentran las categorías del mapa clasificado. La diagonal principal reúne los acuerdos entre filas y columnas, evidenciando coincidencia entre el mapa y la realidad. Los valores que se encuentran fuera de la diagonal indican los errores de asignación. De este modo, aquellos valores marginales en el sentido de las columnas no estarían siendo incluidos en la clasificación. Por el contrario, los valores marginales en el sentido de las filas, indican errores en la clasificación al ser incluidos en una categoría que no se corresponde con la realidad. En el primer caso estaríamos dentro de los errores de omisión (o exclusión), mientras que en el segundo caso apuntamos a los errores de comisión (o inclusión) (Chuvieco, 1990)

Para validar el mapa del P1, se extrajo la información de campo del trabajo realizado por Entraigas (2008). Desafortunadamente para el P2, no se cuenta con datos de campo observados y para el

mapa del P3, se validó teniendo en cuenta los datos tomados durante la campaña agrícola 2015-2016 realizada por Guevara Ochoa et al. (2018)

Se utilizó la ecuación 4.2 que corresponde al índice estadístico Kappa (Congalton, 1991). A partir de la matriz de confusión, esta ecuación calcula la correspondencia entre la imagen clasificada y la real, siendo más precisa la clasificación cuanto más cercano a 1 sea el índice.

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r (x_{ii}) - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 \sum_{i=1}^r (x_{-}(i) * x_{-(+1)})} \quad (4.2)$$

Dónde: N = número total de píxeles de referencia

x_{ii} = número de observaciones en la fila i y en la columna i

x_{i+} = total marginal de la fila i

x_{+i} = total marginal de la columna i

r = número de filas en la matriz

El valor de K puede variar entre -1 y 1. Se consideró la clasificación de la Tabla 4.2, propuesta por Congalton (1991), para expresar cualitativamente la concordancia de los resultados

Tabla 4.2. Clasificación del coeficiente Kappa. Tomado de Congalton (1991).

Kappa (K)	Precisión
0.05 - 0.20	muy baja precisión
0.20 - 0.40	baja precisión
0.40 - 0.55	precisión razonable
0.55 - 0.70	buena precisión
0.70 - 0.85	muy buena precisión
0.85 - 0.99	excelente precisión
0.99 - 1	precisión perfecta

4.2 Modelación hidrológica (modelo SWAT)

Para comprender el impacto que los cambios en el uso del suelo han causado a la dinámica hídrica de la zona de estudio, se utilizó el modelo numérico Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Este modelo semidistribuido que opera a escala diaria y de tiempo continuo, fue desarrollado con el fin de predecir el impacto del uso del suelo en la respuesta hidrológica y en la calidad del agua de

cuencas con suelos heterogéneos (Arnold et al. 1998). SWAT permite simular varios procesos físicos del ciclo hidrológico a diferentes escalas temporales. Además, calcula el balance hídrico por unidades de respuesta hidrológica (HRUs), la cual consiste en una unidad espacial del paisaje que interrelaciona el uso del suelo, tipo de suelo y la pendiente. De este modo, con las HRUs se logra reflejar las variaciones en los procesos hídricos superficiales-subterráneos en la cuenca.

SWAT simula el balance de agua diario a partir de la relación entre la información de entrada y la información de salida, calculada con la ecuación 4.3 de equilibrio hídrico

$$SW_t = SW_o + \sum (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw}) \text{ (mm)} \quad (4.3)$$

Donde: SW_t = Contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_o = Contenido inicial de agua en el suelo (mm)

R_{day} = Cantidad de precipitación diaria (mm)

Q_{surf} = Cantidad de escorrentía en superficie (mm)

ET_a = Cantidad de evapotranspiración real (mm)

W_{seep} = Agua que se infiltra en el perfil del suelo (mm)

Q_{gw} = flujo de retorno (mm)

4.2.1 Datos de entrada al modelo SWAT

Los datos de entrada que requiere el modelo SWAT para simular los procesos hidrológicos son, datos climáticos diarios (para los 13 años simulados), topografía, tipos de suelo y usos del suelo. En la Figura 4.2, se detalla el diagrama de la información de entrada al modelo. La interfaz gráfica utilizada en este estudio es ArcSWAT, ejecutada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS.

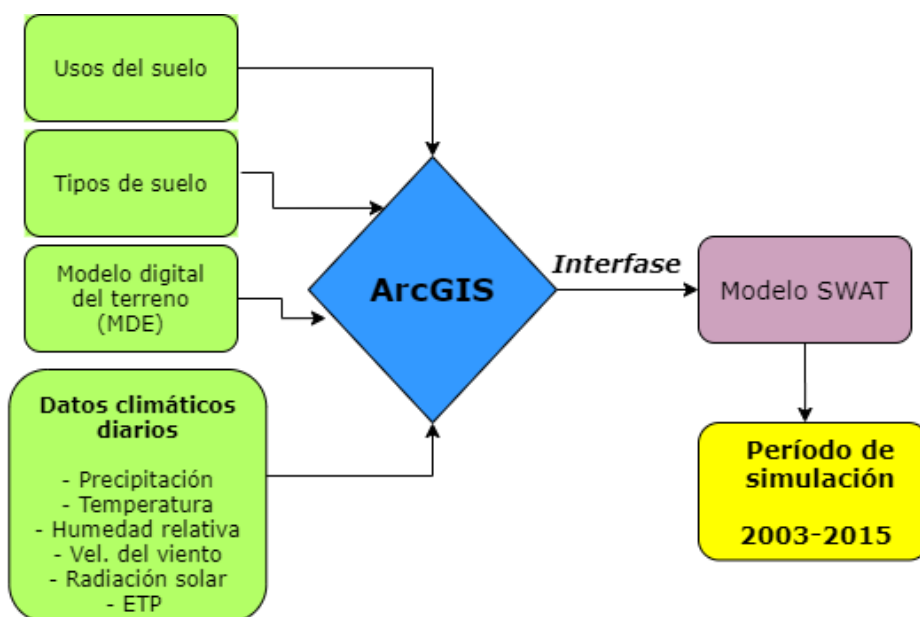


Figura 4.2. Diagrama de los datos de entrada del modelo SWAT.

4.2.1.1 Datos meteorológicos

Se utilizó información diaria de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y evapotranspiración potencial, para el periodo del 2003 al 2015. Esta información se tomó de 3 estaciones meteorológicas y 4 hidrométricas ubicadas en la CSAA, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y a la red de monitoreo de inundaciones del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA). En la Tabla 4.3. se detallan las coordenadas de cada una de las estaciones hidrometeorológicas y en la Figura 4.3. se muestra la distribución espacial de cada una de ellas. En la sección de Anexos se encuentra la tabla con los estadísticos climáticos mensuales calculados para las 7 estaciones (Tablas: A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8).

Tabla 4.3. Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas ubicadas en la cuenca superior del arroyo Del Azul

Estaciones	Longitud (X)	Latitud (Y)
<i>Estaciones meteorológicas</i>		
Azul (SMN)	-59,886	-36,832
Cerro águila	-59,868	-37,143
Chillar	-59,95	-37,267
<i>Estaciones hidrometeorológicas</i>		
Firmeza	-59,968	-36,973
Chiquita	-60,042	-37,062
Siempre amigos	-59,852	-37,016

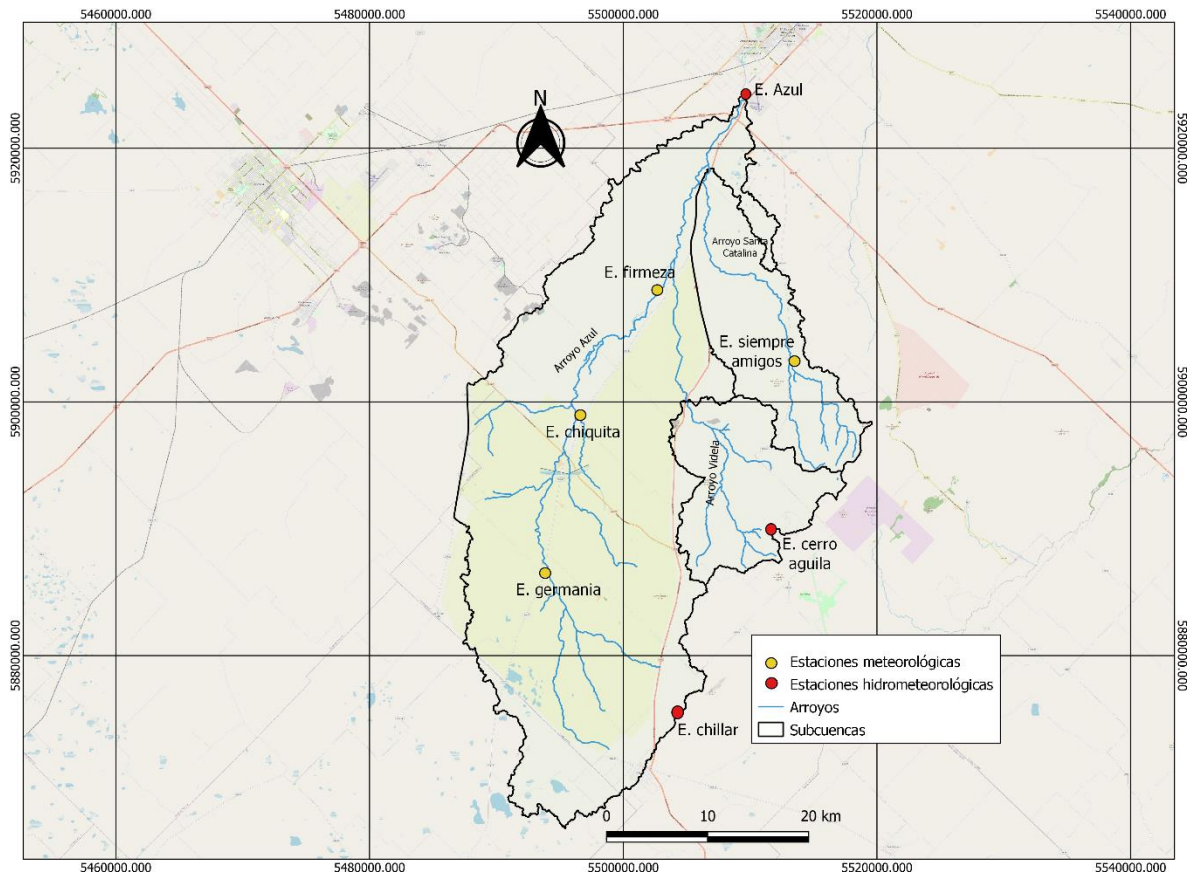


Figura 4.3. Estaciones hidrometeorológicas y meteorológicas en la cuenca superior del arroyo del Azul.

En la Figura 4.4, se presenta la precipitación promedio anual de la CSAA, evidenciando que los años con mayor aporte pluviométrico en el periodo del 2006 al 2015 fueron el 2012 (1315.7 mm) y el 2014 (1037.1 mm). Por el contrario, los años con menor precipitación fueron el 2008 (574.7 mm) y 2013 (593.5 mm). La temperatura promedio anual máxima y mínima varió de forma poco significativa en los 10 años simulados.

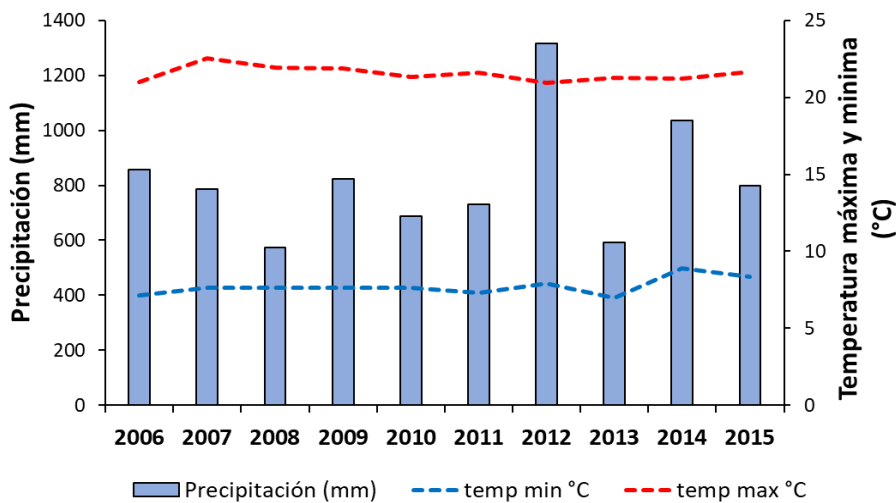


Figura 4.4. Precipitación y temperatura máxima y mínima promedio anual para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul.

En cuanto a la precipitación promedio mensual (Figura 4.5), junio fue el mes con precipitaciones más escasas, ascendiendo solo hasta 30 mm. A partir de agosto las lluvias fueron aumentando hasta alcanzar volúmenes superiores a los 80 mm en los meses de primavera y verano, siendo enero el mes más lluvioso con 100.5 mm.

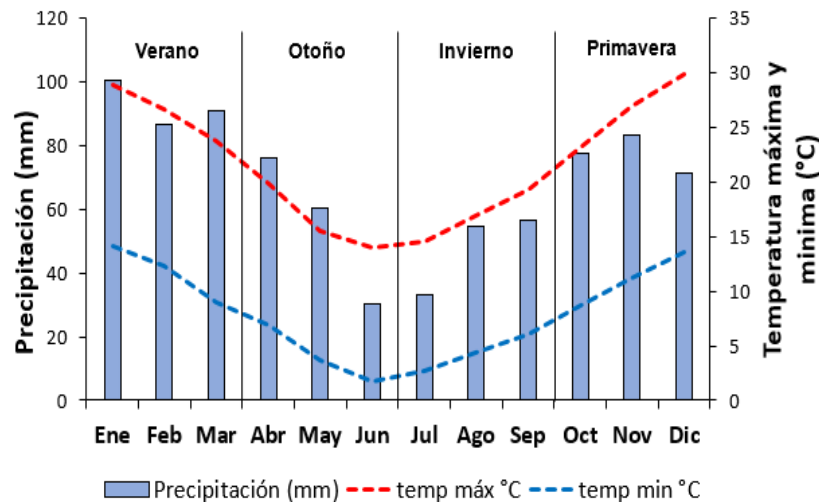


Figura 4.5. Precipitación y temperatura máxima y mínima promedio mensual para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul.

4.2.1.2 Modelo digital de elevación (MDE)

Para la modelación hidrológica en zonas de llanura, es indispensable contar con una topografía de detalle que tenga en cuenta las correcciones de vegetación, depresiones, caminos y canales, dado que producen incertezas en el movimiento del agua en superficie (Guevara-Ochoa, 2019). En este trabajo se usó el modelo digital de elevación del terreno (MDE) de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Esta misión conjunta fue un proyecto liderado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial y la NASA con el fin de obtener la base de datos topográficos a nivel mundial a partir de interferometría radar (Wasilewski y Chormanski, 2009). Este MDE, corregido por Guevara Ochoa et al., (2019), tiene 1 segundo de arco en el ecuador, con una resolución horizontal de 30 metros y vertical de 1 metro.

A partir del MDE y del algoritmo D8 ejecutado en el software ArcGIS, SWAT delimita la red de drenaje y las subcuencas. En la Figura 4.6, se muestra el MDE con las subcuencas Azul superior, Videla y Santa catalina. En cada subcuenca hay un patrón similar de elevaciones, siendo las zonas Sur y Este donde se encuentran las elevaciones máximas y van disminuyendo en dirección al Norte de la CSAA. Las características morfológicas influyen en gran medida en la respuesta de las variables del balance hídrico.

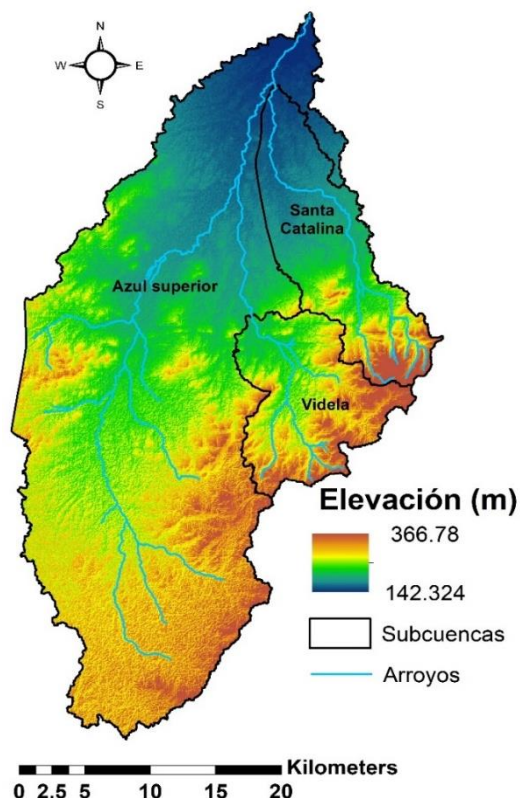


Figura 4.6. Modelo digital de elevación de la cuenca superior del arroyo del Azul.

En la Tabla 4.4, se detallan las principales características morfológicas de las tres subcuencas. Algunas de ellas son, la elevación media, mínima y máxima, el área que ocupa cada subcuenca, la longitud del cauce principal, el porcentaje de la pendiente promedio, el perímetro, que al relacionarlo con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca se obtiene el índice de gravelius, el cual nos da una idea de la forma de las subcuencas; entre más cercano a 1 sea este índice, más ovalada será la cuenca. Cuando los valores se acercan progresivamente hasta 1,75, las cuencas tienden a ser alargadas. Valores superiores indican cuencas irregulares y con menor peligrosidad a las crecidas (Gaspari et al., 2012).

Tabla 4.4. Características morfológicas de las subcuencas Azul superior, Santa Catalina y Videla

Características	SUBCUENCAS		
	Azul superior	Videla	Sta. Catalina
Elevación media (m)	214,3	238,1	201,1
Elevación mínima (m)	142	185	150
Elevación máxima (m)	307	354	366
Área (km ²)	765,3	120,5	140,2
Perímetro (km)	283	84,9	107,8
Pendiente media (%)	2,4	4,1	3,5
Long. Drenaje (km)	150,9	39,3	56,3
Índice de gravelius	2,9	2,2	2,5

Con el MDE corregido se generó el mapa de pendientes de la CSAA (Figura 4.7). Este mapa mostró hacia la zona del sistema de Tandilia pendientes mayores al 6%, disminuyendo gradualmente hacia la zona norte, donde las pendientes son menores al 1%. A partir de esta información, es posible calcular los movimientos de agua como, escorrentía superficial, flujo subsuperficial y el tiempo de concentración en la cuenca.

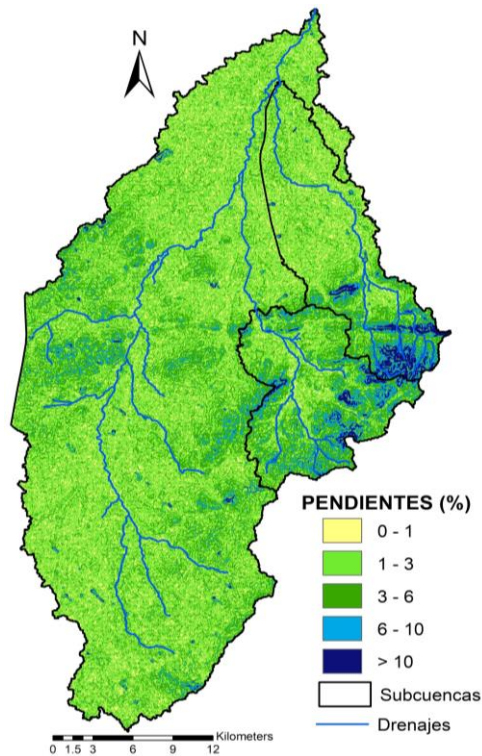


Figura 4.7. Mapa de pendientes de la cuenca superior del arroyo del Azul.

4.2.1.3 Tipos de suelo

Se usó el mapa del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1992) a escala 1:50.000. En la Figura 4.8, se pueden ver las 23 series de tipo de suelo presentes en la zona de estudio. Predominaron los grupos de suelos Argiudoles, Hapludoles y Natracuafes, como se muestra en la Tabla 4.5. Las funciones de pedotransferencia para cada horizonte de cada serie, se presentan en Anexos (Tabla A1).

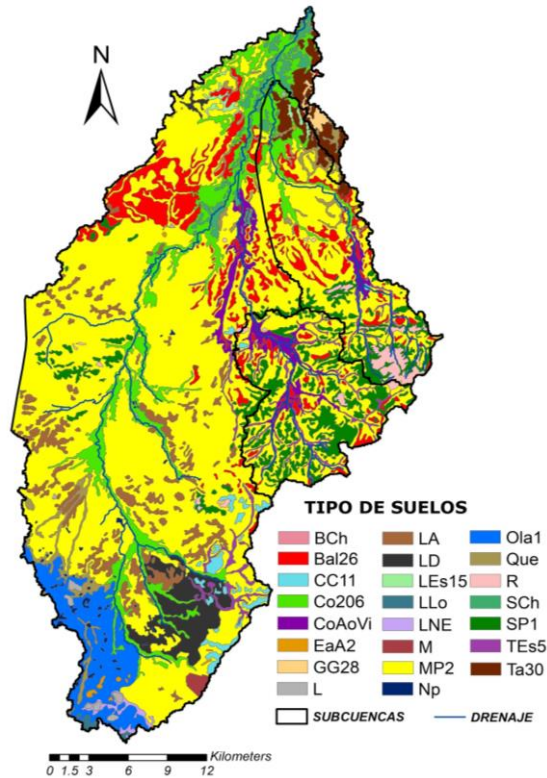


Figura 4.8. Series de suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul

4.2.1.4 Usos de suelo

Se usaron los tres mapas de usos del suelo (Figura 5.2) generados a partir de la metodología descrita en el ítem 4.1. En la Tabla 5.1, se encuentra el área (km²) ocupada por cada cultivo en cada uno de los tres periodos. Si bien los tres mapas poseen información real de usos del suelo, con el mapa del escenario P1 (2006-2007) se calibraron los parámetros del modelo SWAT, por lo que este será el escenario de línea base.

Tabla 4.5. Caracterización de las series de suelos de la cuenca superior del arroyo Del Azul.

SERIE DE SUELOS	CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	NOMENCLATURA	ÁREA (Km ²)	ÁREA (%)
Arroyo Azul	Complejo indiferenciado	Co206	88,1	8,5
Arroyo Videla	Complejo indiferenciado	CoAoVi	22,6	2,2
Tandil	Argiudol típico	Ta30	17,4	1,7
Lagunas	Lagunas	L	2,7	0,3
La Alianza	Paleudol petrocálcico somero	LA	45,5	4,4
La Delicia	Paleudol petrocálcico somero	LD	28,8	2,8
Mar del Plata	Argiudol típico	MP2	559,5	54,2
Napaleofu	Argialbol argiacuico	Np	3,2	0,3
Olavarría	Paleudol petrocálcico mod. prof	Ola1	43,3	4,2
Querandés	Natracuol cálcico mod. prof.	Que	21,1	2,1
Estancia Aldecoa	Argiugol acuico	EaA2	1,4	0,1
La loma	Paleudol petrocálcico profundo	Llo	1,5	0,1
La nueva esperanza	Natrudol típico muy profundo	LNE	3,1	0,3
Balcarce	Paleudol petrocálcico f. mod. prof.	Bal26	72,4	7,0
Cinco cerros	Paleudol petrocálcico somero	CC11	9,9	0,10
General Guido	Natracuol típico	GG28	2,6	0,3
Sierra de los padres	Hapludol lítico	SP1	60,5	5,9
Tres esquinas	Argiudol vértico	TEs5	18,7	1,8
Blanca chica	Paleudol petrocálcico profundo	BCh	0,1	0,01
La escocia	Natrudol típico mod. profundo	LEs15	2,9	0,3
Sierra chica	Natrudol petrocálcico mod. prof.	SCh	14,5	1,4
Roca	Roca	R	11,1	1,1
Misceláneas	Misceláneas	M	2,2	0,2

4.2.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico

El periodo simulado por SWAT fue de 13 años (2003-2015), de los cuales, se tomó un periodo de calentamiento (Warm up) de 3 años (2003-2005) para estabilizar las condiciones iniciales de contenido de agua en el suelo en el modelo. El periodo de calibración fue 2006-2010 y el periodo de validación se realizó en el periodo 2011-2015.

Mediante la interfaz SWAT CUP de SWAT y a través del algoritmo de ajuste de incertidumbre secuencial (SUF1-2) (Abbaspour, 2007), se realizó el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico para la cuenca superior del arroyo Del Azul. La variable observada, utilizada para ajustar el modelo fue el caudal diario, medido en la estación hidrométrica Seminario, la cual se encuentra a la salida de la cuenca. Para valorar el grado de ajuste del modelo SWAT, se utilizaron tres métodos estadísticos cuantitativos. Estos métodos son, el coeficiente de eficiencia de modelado de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970), el coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo porcentual o desviación relativa de los caudales (PBIAS).

El coeficiente NS, es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de datos medidos. Este coeficiente

indica qué tan bien se correlacionan los datos observados frente a los datos simulados en un ajuste de línea 1:1. Cuando el NS oscila entre 0 y 1, generalmente son niveles aceptables de rendimiento. Este estadístico es computado por medio de la ecuación 4.2.1:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{mean})^2} \quad (4.2.1)$$

donde: Y_{obs} = Son los datos observados de caudal diario

Y_{sim} = Los datos simulados de caudal diario

Y_{mean} = Es la media de los datos observados de caudal diario

El coeficiente de determinación R^2 , describe la proporción de la varianza en los datos observados y puede variar entre 0 y 1. Cuando los valores de R^2 , son superiores a 0,5 se consideran satisfactorios.

El PBIAS es la tendencia media de los datos simulados para ser más grande o más pequeños que sus contrapartes observadas. El valor óptimo de PBIAS es 0, por lo que los valores de baja magnitud indican que la simulación es precisa. Los valores positivos indican sesgo de modelo de subestimación, y los valores negativos indica sesgo de modelo de sobreestimación. El PBIAS se calcula con la ecuación 4.2.2:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y^{obs} - Y^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y^{obs})} \quad (4.2.2)$$

donde: Y^{obs} = son los datos observados de caudal diario

Y^{sim} = los datos simulados del caudal diario

En cuanto al proceso de validación, se utilizó el mismo esquema metodológico planteado en la calibración, pero para el periodo del 2011 al 2015.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Caracterización de coberturas y usos del suelo

De acuerdo a la Figura 5.1, donde se muestra el porcentaje de área ocupada por los diferentes usos del suelo en la cuenca superior del arroyo Del Azul, en el escenario inicial (P1) la cobertura predominante fue el sistema de doble cultivo trigo-soja, ocupando el 35,5% del área de la cuenca. Asimismo, este escenario contó con el mayor porcentaje de pasturas y pastizales naturales y cultivos de girasol, abarcando alrededor del 28% de la superficie de la cuenca. En cuanto al escenario P2, los cultivos de soja, maíz y las pasturas y pastizales naturales, ocuparon porcentajes similares entre sí, cubriendo más del 50% de la CSAA. A pesar que el cultivo de trigo-soja se redujo en casi un 23%, fue el cultivo más abundante en el escenario P2. Igualmente, el área cubierta por pasturas y pastizales naturales y cultivos de girasol, decreció 27% y 5,5%, respectivamente. Por el contrario, la superficie sembrada con cultivos de invierno, soja y maíz, aumentó aproximadamente 45%, 92% y 21% correspondientemente.

Para el escenario P3, el área cubierta por cultivos de soja se incrementó alrededor del 98% respecto al escenario P2, es decir, que respecto al escenario P1 su ocupación aumentó cerca del 280%. Asimismo, la superficie sembrada con cultivos de trigo-soja aumentó aproximadamente 23% en relación al área ocupada en el escenario P2. Por lo tanto, en el escenario P3, los cultivos de soja y trigo-soja predominaron, ocupando más del 70% del territorio destinado a uso agrícola. En consecuencia, los cultivos de invierno, maíz, girasol y pasturas y pastizales naturales, presentaron una notable reducción ocupando solo el 22% de la CSAA.

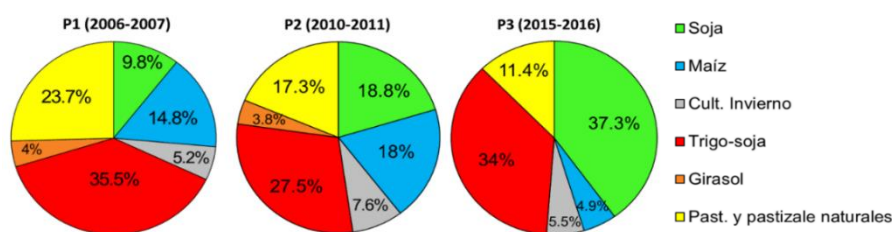


Figura 5.1. Porcentaje de área ocupada por los diferentes usos del suelo en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.

En la Figura 5.2, se presentan los tres mapas de coberturas y usos del suelo elaborados a partir de la metodología descrita en el capítulo anterior. Cada mapa muestra la distribución de las coberturas identificadas en la CSAA para los periodos 2006-2007, 2010-2011 y 2015-2016. Estas coberturas son: cultivos de soja (SJ), trigo-soja (TRSJ), maíz (MZ), cultivos de invierno (CINV), girasol (GS), pasturas y pastizales naturales (PPN), afloramientos rocosos (R), montes (MNT) y bajos y lagunas (BL).

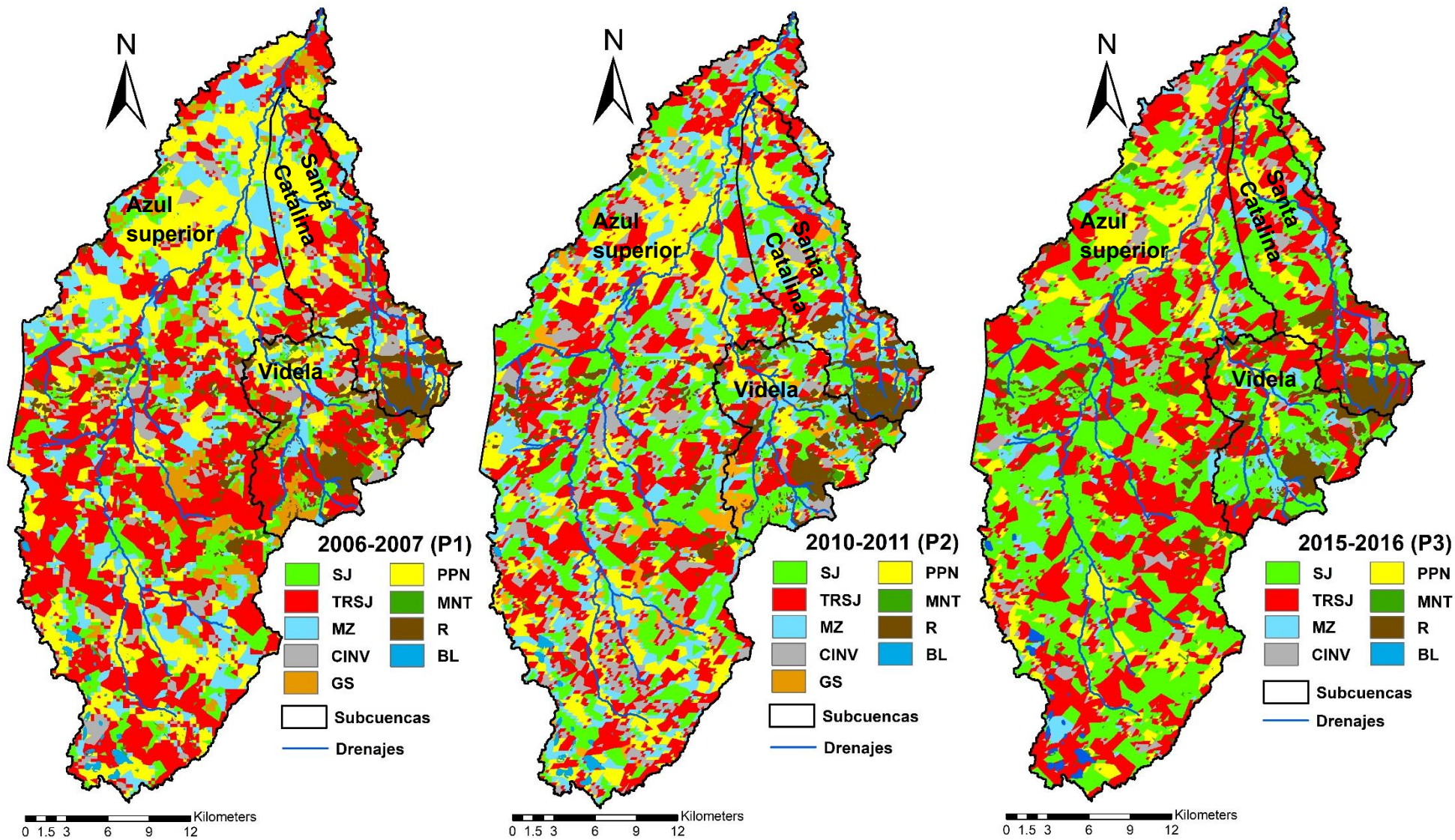


Figura 5.2. Mapas de usos del suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos

La Tabla 5.1, muestra el área cubierta en km² por los usos del suelo presentes en la cuenca superior del arroyo del Azul. Si bien las pasturas y pastizales naturales no son un cultivo, se tuvo en cuenta en el cálculo total del área cultivada ya que esta cobertura participa en la rotación de cultivos.

Tabla 5.1. Área (Km²) ocupada por cada uso del suelo para los tres periodos propuestos en la cuenca superior del arroyo del Azul

	P1 (2006-2007)	P2 (2010-2011)	P3 (2015-2016)
Trigo-soja	364,3	282,01	348,41
Soja	100,6	193,10	382,27
Maíz	151,7	184,23	50,30
Cult. Invierno	53,6	77,52	56,14
Girasol	41,4	39,11	
Past. y pastizales naturales	243,0	177,41	117,44
Afloramientos rocosos	56,7	56,7	56,7
Montes	8,8	10,00	8,81
Cuerpos de agua	5,9	5,9	5,9
Total área cultivada (km²)	954,6	953,4	954,6
Área total de la cuenca (km²)	1026,00	1026,00	1026,00

5.1.1 Validación de los mapas de coberturas y usos del suelo

Como se mencionó en el capítulo anterior, la validación para el escenario P2 no se realizó por la falta de disponibilidad de datos confiables de campo. No obstante, la metodología basada en firmas fenológicas derivadas de NDVI, usada para realizar los 3 mapas de usos del suelo, dio evidencias de ser confiable gracias a los resultados de las dos validaciones hechas.

El resultado de la validación del mapa P1, arrojó un coeficiente Kappa de 0,71 y, por lo tanto, se asumió una precisión muy buena en la clasificación. Este mapa tuvo una precisión total de 78% y se calcularon las precisiones del productor y del usuario. De acuerdo a la Tabla 5.2, el cultivo de trigo-soja presentó la precisión del productor más baja con 62,6% (indica el porcentaje de concordancia de que un dato de campo sea clasificado de forma similar en el mapa). Este cultivo presentó un error por omisión o exclusión de 11,4% asociado a la soja y un 8% de error de comisión o inclusión, asociado a las pasturas y pastizales naturales. Es posible que estos errores ocurrieran en la digitalización de los polígonos usados como datos de campo que se extrajeron del mapa de Entraigas (2008).

Tabla 5.2. Matriz de confusión para el mapa de usos del suelo del escenario P1.

DATOS CLASIFICADOS	DATOS DE CAMPO										Precisión de usuario (%)
	SJ	TRSJ	MZ	CINV	GS	PPN	MNT	BLG	R	TOTAL	
SJ	93.8	11.4	2.9	0.0	13	1.3	1.2	0.6	0.9	8.6	56
TRSJ	2.7	62.6	2.9	2.8	4.3	8	8.2	2.2	1.9	19.9	78
MZ	1.1	9.4	90.2	0.0	3.3	8.9	5	0.2	0.7	9.1	28.8
CINV	0.0	3.6	0.0	96.5	0.0	1.4	0.5	0.6	0.2	4.3	64.3
GS	1.85	2.4	0.31	0.0	75	0.1	0.4	0.01	0.2	1.5	48.7
PPN	0.5	7.9	3.1	0.1	0.1	77.5	8.7	3.4	1.3	35.7	92.6
MNT	0.0	0.6	0.3	0.3	1.3	1.1	68.4	1.3	0.1	3	76.6
BLG	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	88.6	0.0	1.7	91.2
R	0.1	2.1	0.3	0.3	3.1	1.4	7.4	3	94.7	16.3	90.9
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR (%)	93.8	62.6	90.2	96.5	75	77.5	68.4	88.6	94.7		
Precisión total	317172 / 406133 = 78%					Coefficiente Kappa				0.71	

En la Tabla 5.3, se muestra la validación del escenario P3 la cual obtuvo una precisión total de 90,3% y un coeficiente Kappa de 0,87, considerando la precisión de este mapa como excelente. El cultivo que tuvo la menor precisión del productor fue el maíz con 84,8% de píxeles clasificados correctamente. Su error por omisión fue de 6,9% asociado al cultivo de soja y el error por comisión fue de 0,6% asociado al cultivo de trigo-soja. Con estos resultados, se evidenció que la metodología empleada representa satisfactoriamente los patrones espacio-temporales de los principales usos del suelo.

Tabla 5.3. Matriz de confusión para el mapa de usos del suelo del escenario P3.

DATOS CLASIFICADOS	DATOS DE CAMPO									Precisión de usuario (%)
	SJ	TRSJ	MZ	CINV	PPN	MNT	BLG	R	TOTAL	
SJ	96	3.2	6.9	0.6	1.5	3.2	1	1.6	34.2	95
TRSJ	1.6	91.6	6.5	6.1	1.4	3.4	1.4	1.8	33.3	95.3
MZ	0.5	0.6	84.8	0.1	0	0.4	0.2	0.3	4.5	90.5
CINV	0.1	1.4	0.1	91.5	0.2	0.6	0.1	0.1	5.2	89
PPN	0.8	1	0.1	0.8	95.8	1.5	0.4	0.1	11.5	94
MNT	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	41.5	0.7	0	1.1	71
BLG	0.1	0.2	0.3	0	0.1	0.1	42.6	0	0.7	82
R	0.4	1.2	0.8	0.4	0.2	3	1.5	74.1	6.2	88
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100		
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR (%)	96	91.6	84.8	91.5	95.8	41.5	42.6	74.1		
Precisión total	1002919 / 1110041 = 90.3%				Coefficiente Kappa				0.87	

5.2 Análisis espacio-temporal de los usos del suelo

A partir del software ENVI 4.7 se detectó en qué medida cada cobertura fue reemplazada por los diferentes usos del suelo y en qué sectores de la cuenca estos cambios tuvieron lugar. El análisis de cambios espacio-temporales se realizó al contrastar las coberturas del escenario P1 al P2 y del P1 al P3.

5.2.1 Cambios espacio-temporales de las Pasturas y Pastizales Naturales

En la Figura 5.3.a, se muestran los mapas con los cambios espacio-temporales de las pasturas y pastizales naturales y, en la Figura 5.3.b, se presenta el área en que esta cobertura fue reemplazada por los diferentes cultivos. De los 1026 Km² que posee aproximadamente la CSAA, las pasturas y pastizales naturales ocuparon cerca de 243 Km² en el escenario P1. Para el escenario P2, esta cobertura se redujo a 177,8 km² siendo reemplazada principalmente por cultivos de trigo-soja y maíz, los cuales desplazaron a las pasturas y pastizales naturales en un 22% y 19% respectivamente. Los cultivos de invierno, soja, girasol y los montes, generaron cambios inferiores al 7% cada uno.

Del escenario P2 al P3, la mayoría de los reemplazos fueron causados por cultivos de soja y trigo-soja, los cuales cubrieron más del 50% del territorio ocupado por las pasturas y pastizales naturales en el escenario P2. El cultivo que generó menos cambios fue el de maíz, reemplazando el 3% de esta cobertura. Al comparar los cambios que tuvieron las pasturas y pastizales naturales del P1 al P3, se logra dimensionar la pérdida de territorio que tuvo esta cobertura en el transcurso de 10 años. La superficie cubierta por este uso del suelo, decreció aproximadamente 52%, siendo reemplazada principalmente por cultivos de soja (30,8%) y trigo-soja (25,5%). Más de la mitad de las sustituciones de las pasturas y pastizales naturales, sucedieron hacia el norte de la CSAA, abarcando territorios de la subcuenca Azul superior y Santa Catalina.

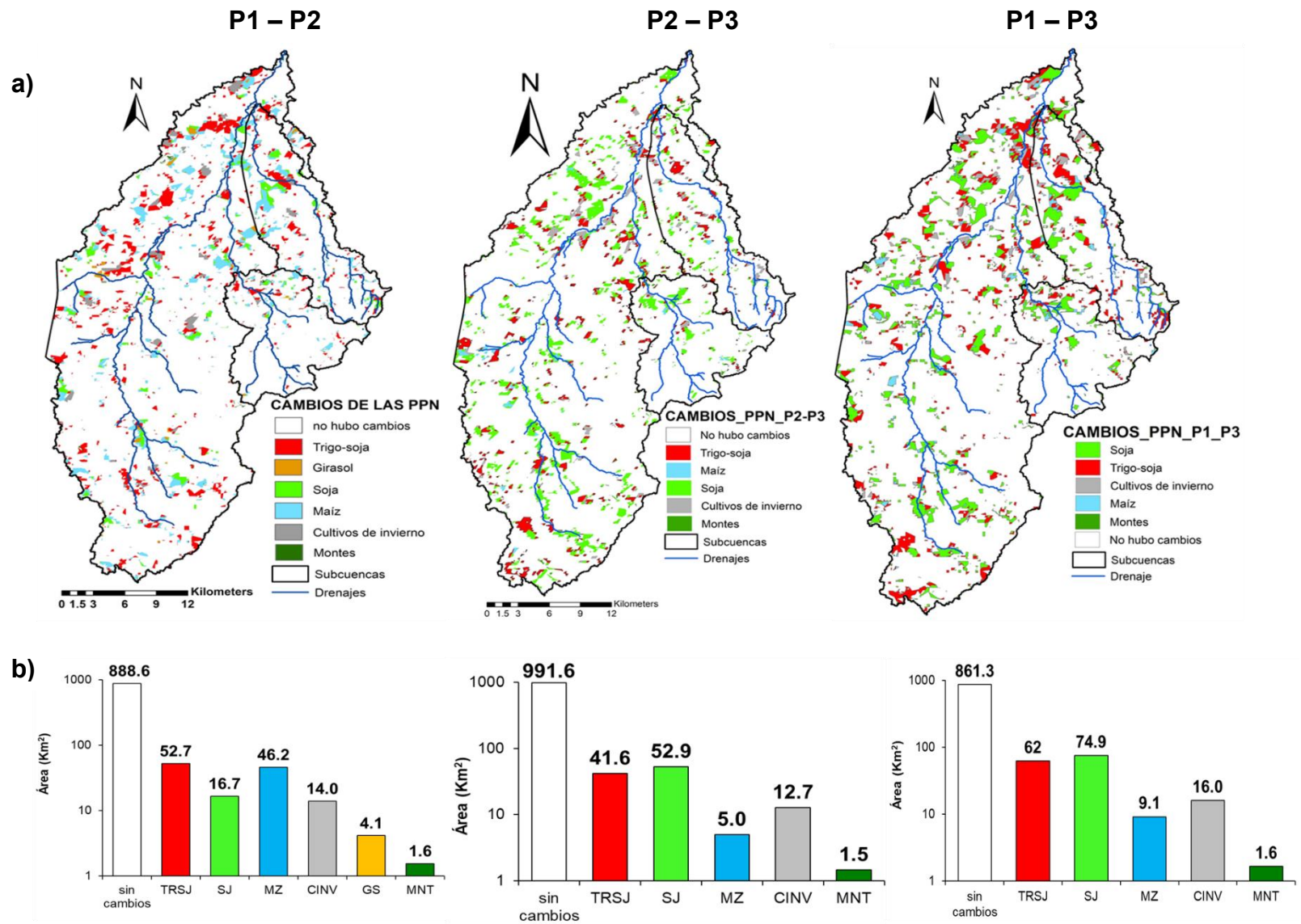


Figura 5.3. (a). Mapas de cambios espacio temporales de las pasturas y pastizales naturales (PPN) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a las pasturas y pastizales naturales

5.2.2 Cambios espacio-temporales de los cultivos de trigo-soja

De acuerdo a la figura 5.4.a, del escenario P1 al P2 el cultivo de trigo-soja fue reemplazado en mayor medida por cultivos de soja, cubriendo aproximadamente el 21% del área ocupada por el cultivo en cuestión. Otro cultivo que generó un importante desplazamiento, fue el de maíz, abarcando aproximadamente el 18% del territorio con trigo-soja. Los principales cambios de usos del suelo se generaron hacia la cuenca media y baja.

Los cambios que tuvo el sistema de doble cultivo del escenario P2 al P3, sucedieron a lo largo de toda la cuenca. Además, casi la mitad de los reemplazos fueron por el cultivo de soja, el cual sustituyó aproximadamente el 45% de cultivos de trigo-soja. Por otro lado, las pasturas y pastizales naturales causaron el 8% de las modificaciones, el cultivo de maíz el 5,3% y los cultivos de invierno el 4,5%. A pesar que el territorio donde se ha sustituido el trigo-soja es bastante extenso, esta cobertura incrementó su área en un 23,5% para el escenario P3.

Del escenario P1 al P3, los cambios del trigo-soja fueron muy similares a los reemplazos del escenario P2 al P3, evidenciando la intensificación en la siembra de soja a partir de la campaña 2010-2011, principalmente en los sectores de serranías.

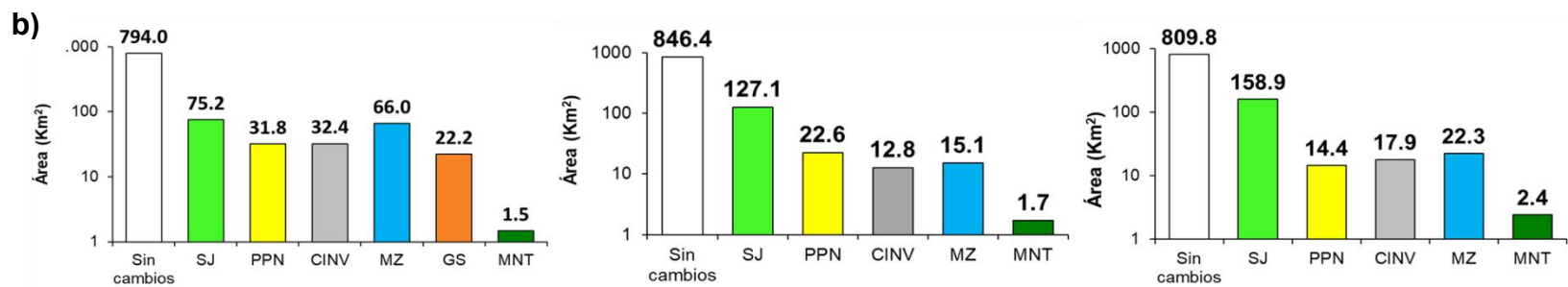
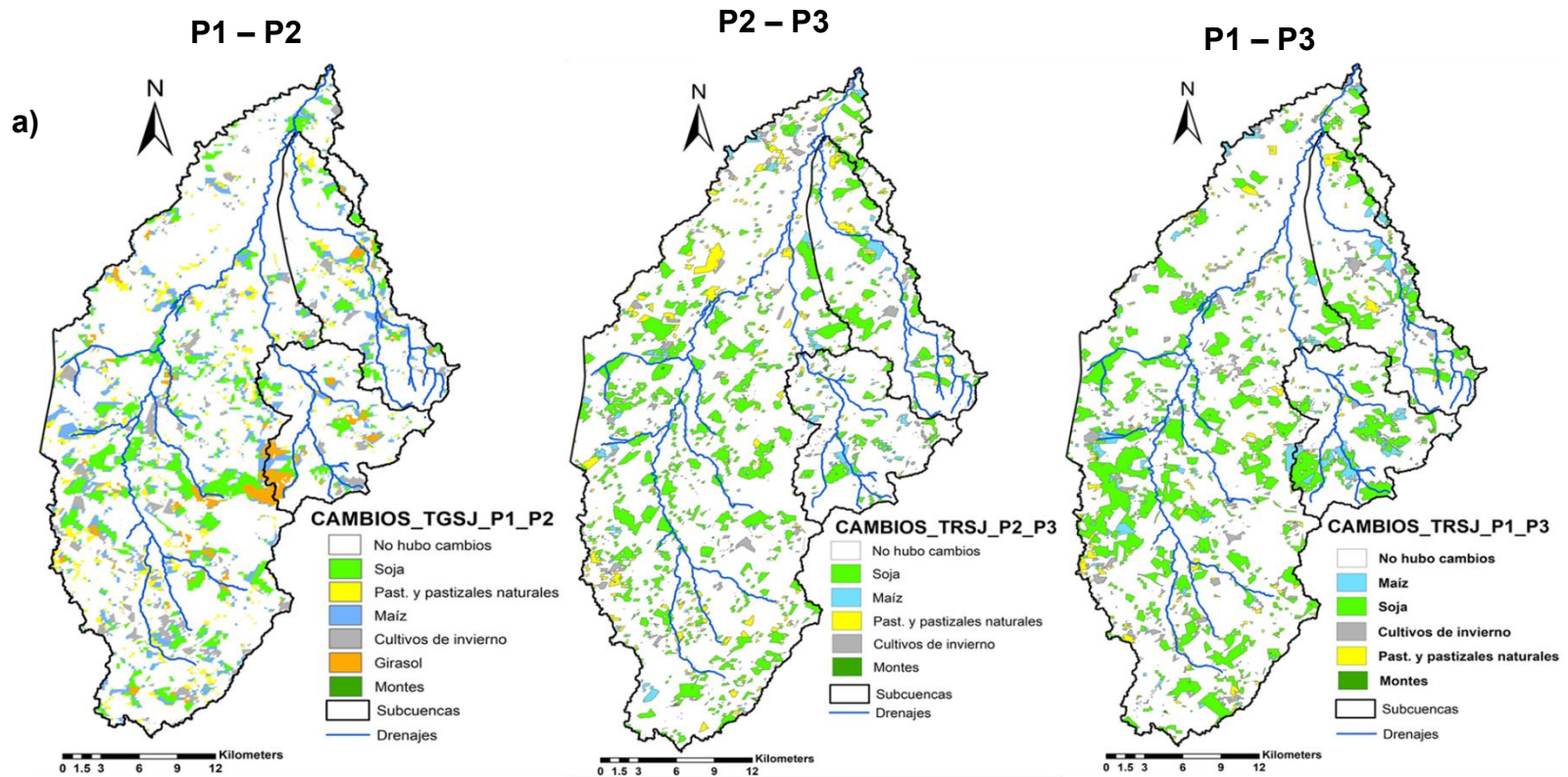


Figura 5.4. (a). Mapas de cambios espacio temporales del sistema de doble cultivo trigo-soja (TRSJ) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de trigo-soja

5.2.3 Cambios espacio-temporales del cultivo de soja

De acuerdo a la figura 5.5.a, el territorio sembrado con cultivos de soja aumentó de forma acelerada a través de los años. El hecho que las áreas en blanco (sin cambios) en los mapas de cambios de la soja sean mayores que en los otros mapas, indica que fueron pocos los reemplazos a los que este cultivo estuvo sometido. Del escenario P1 al P2, el cultivo de soja fue sustituido en un 15,1% por cultivos de trigo-soja y en un 8,3% por cultivos de maíz, principalmente en la parte central y sur de la CSAA. Los cultivos de invierno, de girasol y las pasturas y pastizales naturales, representaron cambios en un menor porcentaje sin mostrar una preferencia espacial. Los reemplazos del cultivo de soja por cultivos de trigo-soja se intensificaron por toda la CSAA, incluso en las zonas con mayores elevaciones, representando cerca del 50% de los cambios del escenario P2 al P3. Las otras coberturas generaron cambios en un 5,3% (maíz), 4,7% (cultivos de invierno), 2,5% (pasturas y pastizales naturales) y 0,2% (montes).

Del escenario P1 al P3, aproximadamente el 53% del territorio con soja estuvo sometido a cambios, de los cuales el 41,5% fueron por cultivos de trigo-soja, 5,2% por cultivos de invierno, 4,1% por cultivos de maíz, 2,1% por pasturas y pastizales naturales y solo un 0,2% fue reemplazado por montes. Si bien los cambios del cultivo de soja fueron relativamente pocos, el aumento que consiguió del P1 al P3 fue casi exponencial, incrementando su área ocupada en un 280%.

5.2.4 Cambios espacio-temporales del cultivo de maíz

El cultivo de maíz es uno de los usos del suelo que más sufrió cambios. Como se muestra en la Figura 5.6.b, los principales reemplazos del escenario P1 al P2 fueron por los cultivos de trigo-soja (24,2%), soja (22,7%) y pasturas y pastizales naturales (16,3%). De acuerdo a la Figura 5.6.a, en general no las modificaciones se dieron en la cuenca media y baja.

De acuerdo al área "sin cambios" y a la Figura 5.6.a, del escenario P2 al P3 se presentaron los mayores reemplazos del cultivo de maíz. Estos cambios, estuvieron liderados por los cultivos de trigo-soja y soja, los cuales sustituyeron al cultivo de maíz en aproximadamente 74%. Los reemplazos del cultivo de maíz por pasturas y pastizales naturales, fueron de aproximadamente 10%, principalmente hacia las zonas de menor pendiente.

Del escenario P1 al P3, los reemplazos por cultivos de trigo-soja (37,2%) y soja (36,6%), fueron muy similares a los cambios del escenario P2 al P3. Estos resultados, evidencian una vez más que a partir de la campaña 2010-2011, se intensificó la siembra de cultivos de secano en la zona de estudio.

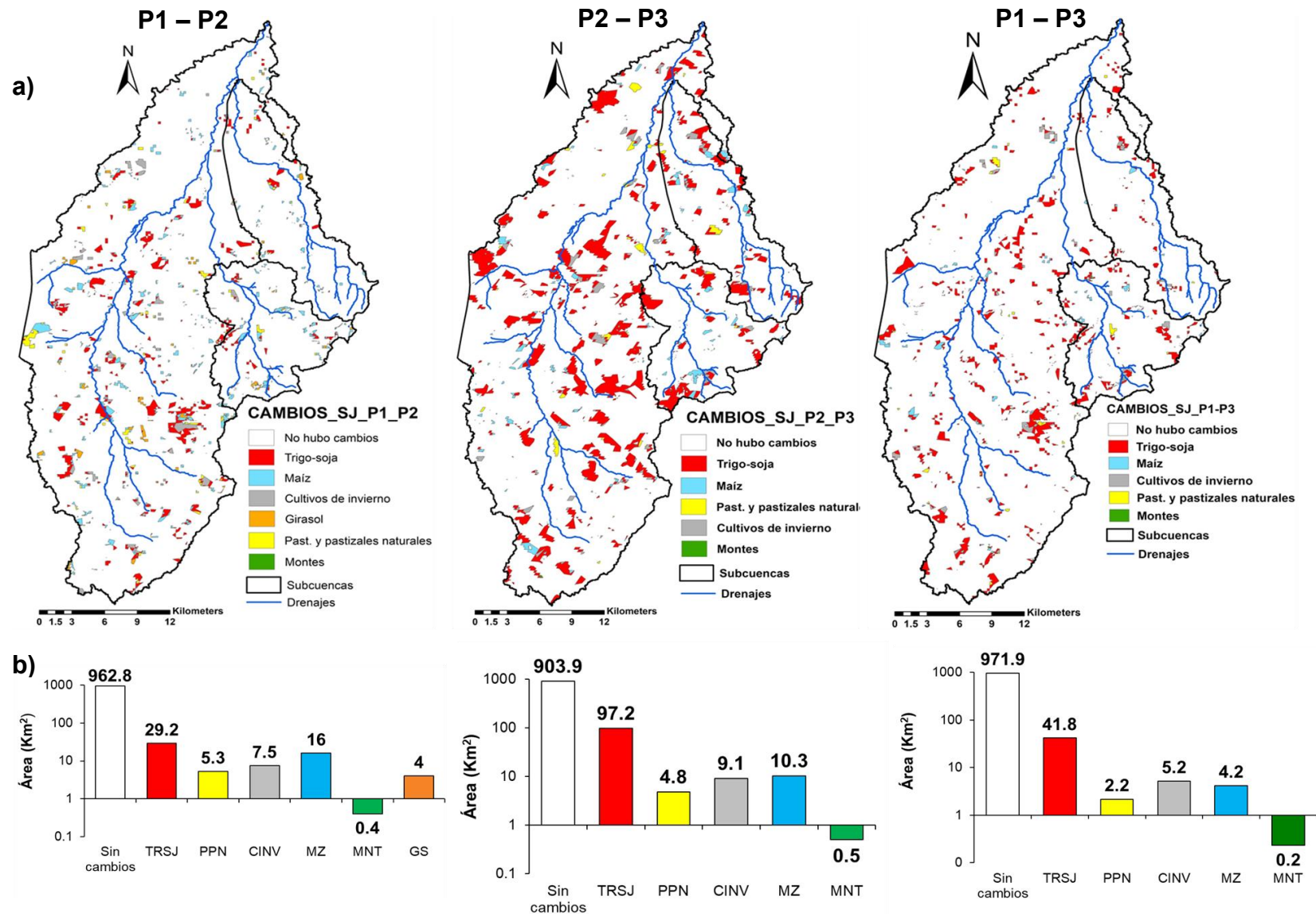


Figura 5.5. (a). Mapas de cambios espacio temporal del cultivo de soja (SJ) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de soja.

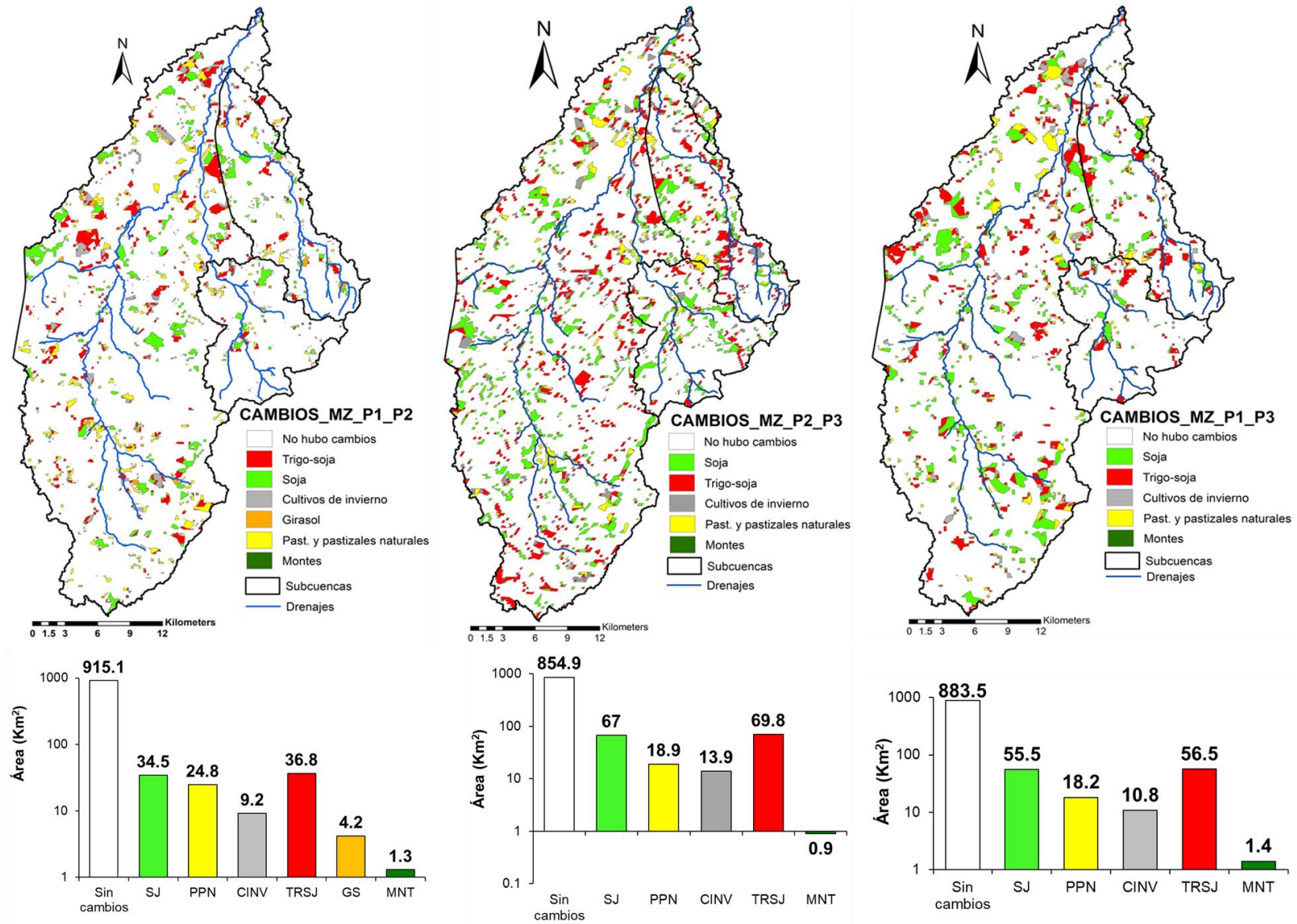


Figura 5.6. (a). Mapas de cambios espacio temporales del cultivo de maíz (MZ) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de maíz.

5.2.5 Cambios espacio-temporales de los cultivos de invierno

En la Figura 5.7.a, se presentan los mapas con los cambios espacio-temporales de los cultivos de invierno. De acuerdo a esta información, del escenario P1 al P2, el cultivo de trigo-soja generó la mayoría de los reemplazos (aproximadamente el 29% de los cultivos de invierno), seguido por los cultivos de soja (16,4%), maíz (15,3%), pasturas y pastizales naturales (11,6%), cultivos de girasol (4,1%) y los montes (0,2%).

La mayoría de los cambios sucedieron en la llanura de transición, donde predominan las pendientes de 3-6%. Los cambios del escenario P2 al P3, fueron principalmente por cultivos de soja, los cuales reemplazaron casi el 54% de la superficie cubierta por cultivos de invierno. Adicionalmente, el cultivo de trigo-soja generó el 24% de los cambios, y las pasturas y pastizales naturales junto con el cultivo de maíz, generaron el 13,5% de las modificaciones.

Del escenario P1 al P3, los reemplazos fueron en su mayoría por cultivos de soja y trigo-soja, sustituyendo alrededor del 74% los cultivos de invierno. El cultivo de maíz produjo el 8.4% de los cambios y las pasturas y pastizales naturales, el 7,3%.

5.2.6 Cambios espacio-temporales del cultivo de girasol

Como se muestra en la figura 5.8, el cultivo de girasol fue en su mayoría reemplazado por cultivos de soja (48,3%) y trigo-soja (30,9%), principalmente hacia la zona sur-este de la cuenca, cerca del sistema de Tandilia. Las pasturas y pastizales naturales solo representaron el 1% de los cambios. Como se mencionó anteriormente, el cultivo de girasol en el escenario P3 no fue detectado con la metodología usada, de modo que sólo se analizaron los cambios ocurridos del escenario P1 al P2.

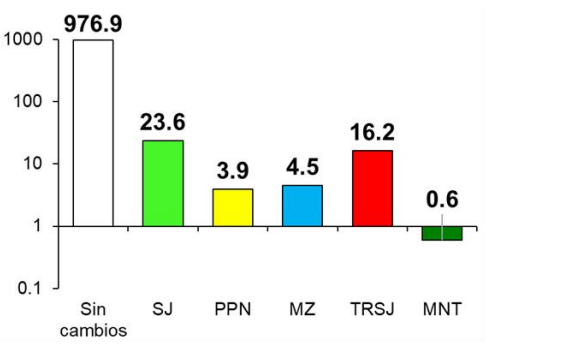
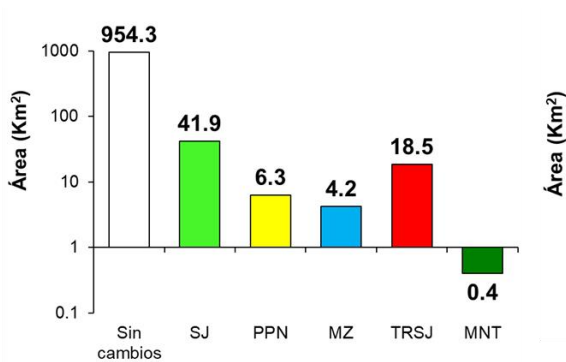
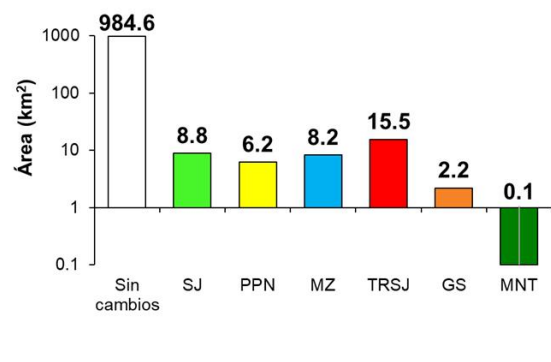
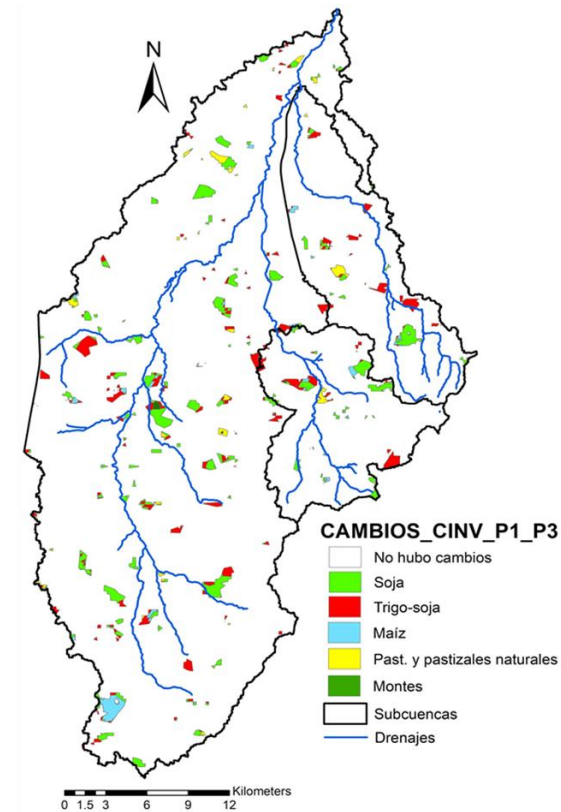
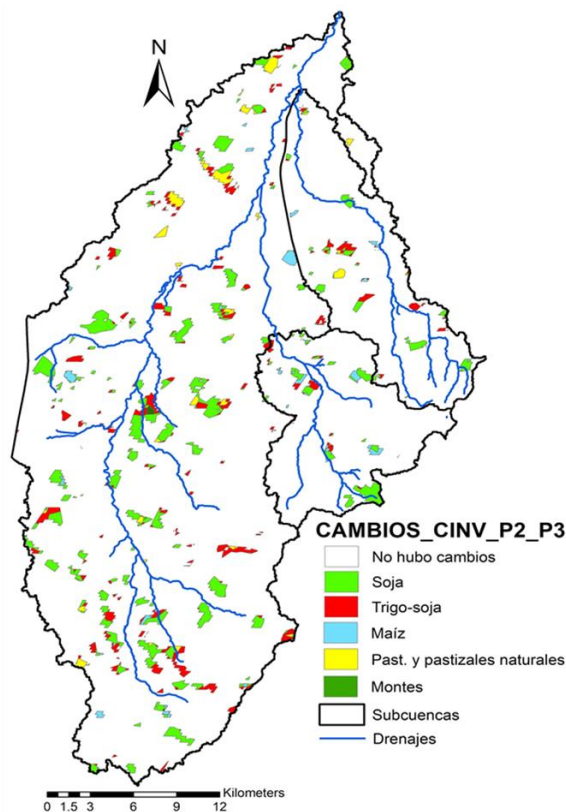
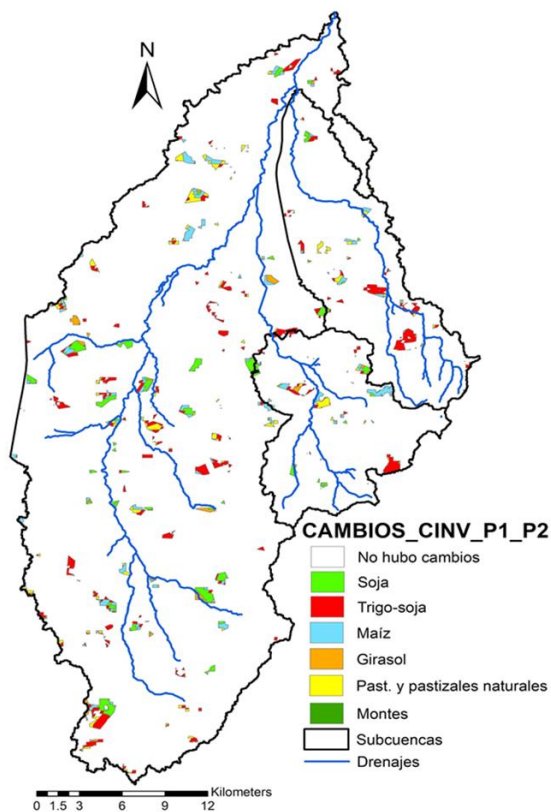


Figura 5.7. (a). Mapas de cambios espacio temporales de los cultivos de invierno (CINV) para los tres escenarios propuestos. (b). Área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de invierno.

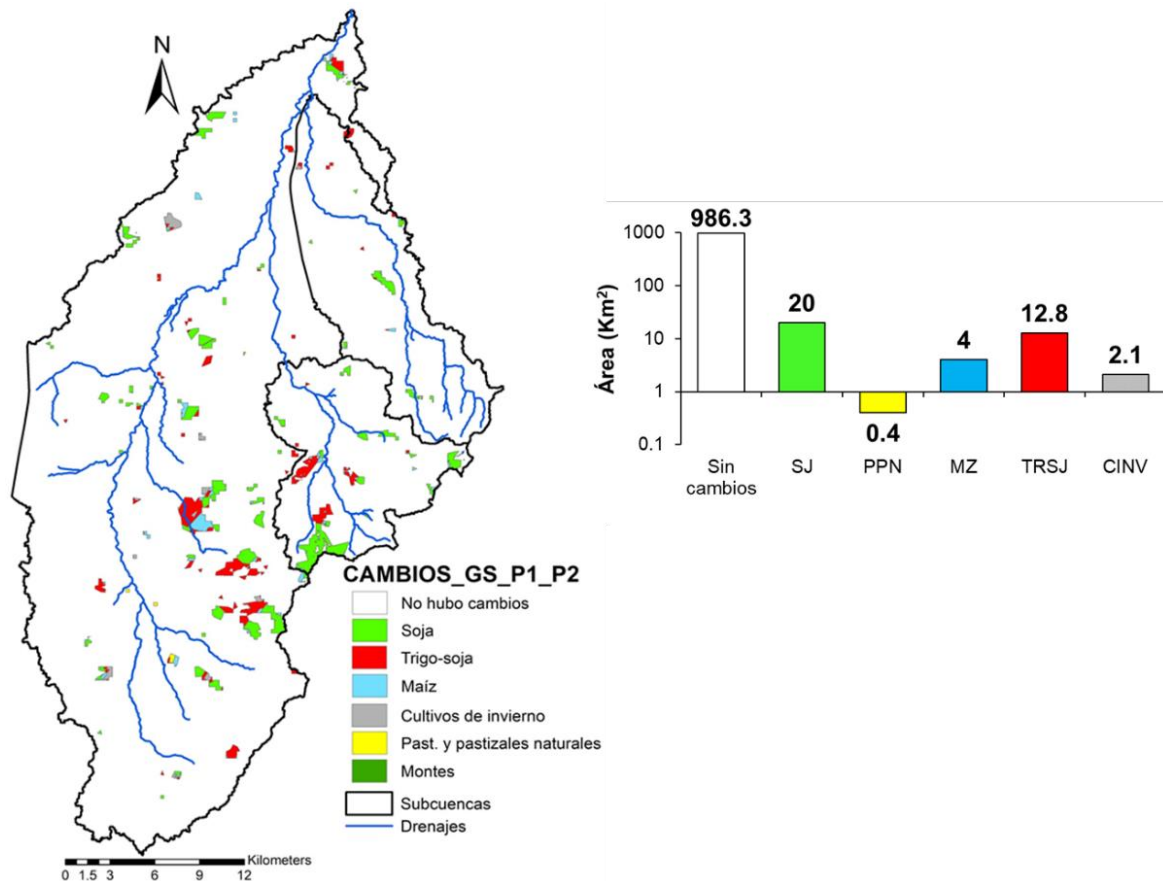


Figura 5.8. Mapa de cambios espacio temporales del cultivo de girasol (GS) y área de las coberturas que reemplazaron a los cultivos de girasol del escenario P1 al P2.

5.3 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT

A partir del análisis de sensibilidad, se determina la tasa de cambio en la salida del modelo (caudal) respecto a los cambios en los parámetros de entrada. Los parámetros de entrada de SWAT se basan en procesos reales y deben mantenerse dentro de un rango de incertidumbre prudente. De manera que, el primer paso en el proceso de calibración y validación en SWAT, es la determinación de los parámetros más sensibles (Arnold et al. 2012). La sensibilidad de los parámetros, se determinó mediante el algoritmo SUFI-2, el cual permite jerarquizar la secuencia de la calibración con el fin de representar los caudales observados y las condiciones físicas naturales existentes en la cuenca. Este procedimiento tiene la desventaja de necesitar numerosas simulaciones.

La jerarquización de parámetros realizada por medio del análisis de sensibilidad, permitió calibrar el modelo a fin de obtener el set de parámetros que mejor representen los caudales observados en la estación hidrométrica de Seminario, estación ubicada a la salida de la cuenca. En la Tabla 5.4, se muestran los 22 parámetros de entrada al modelo SWAT con su respectiva descripción, valor calibrado y rangos mínimos y máximos en que se ajustó cada parámetro. Algunos de los parámetros

que mostraron mayor repercusión en el ajuste del modelo son, la longitud de la pendiente (SLSOIL), la profundidad del perfil del suelo (SOL_Z), el umbral de profundidad de agua en el acuífero libre (GWQMN) y la capacidad de agua disponible en el perfil del suelo (SOL_AWC), confirmando así la importancia de los parámetros que interfieren en los movimientos verticales de agua en el suelo.

Tabla 5.4. Parámetros de entrada al modelo SWAT.

Parámetro	Descripción	Método	Mínimo	Máximo	Valor
SLSOIL.hru	Longitud de la pendiente para flujo lateral subsuperficial	Reemplazo	-10	150	-9.0
SOL_Z.sol (mm)	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa	Relativo	-0.3	0.3	-0.1
HRU_SLP.hru	pendiente media de la HRU	Reemplazo	0	1	0.3
GWQMN.gw (mm)	Umbral de almacenamiento de agua en el acuífero libre para la entrega de agua al cauce	Reemplazo	0	5000	1528.0
SOL_AWC.sol	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo	Relativo	-0.5	0.5	0.4
ALPHA_BF.gw (days)	Factor alpha de flujo base	Reemplazo	0	1	0.5
GW_REVAP.gw	Coefficiente "revap" de aguas subterráneas	Reemplazo	0.02	0.2	0.1
CH_N2.rte	El valor "n" de Manning para el canal principal	Reemplazo	-0.04	0.3	0.0
CN2.mgt	Número de curva SCS	Relativo	-0.3	0.3	-0.1
CH_S1.sub	Pendiente media de los canales tributarios	Reemplazo	0	5	2.0
RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo	Reemplazo	0	1	0.1
ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Reemplazo	0	1	0.4
EVRCH.bsn	Alcance del valor de ajuste de la evaporación	Reemplazo	0	1	0.5
EPCO.hru	Factor de compensación de absorción de la planta	Reemplazo	0	1	0.7
GW_DELAY.gw (days)	Retraso del agua subterránea	Reemplazo	-100	20	-88.3
TRNSRCH.bsn	Fracción de pérdidas de transmisión del canal principal que ingresa al acuífero profundo	Reemplazo	-1	1	-0.1
REVAPMN.gw (mm)	Umbral de almacenamiento de agua en el acuífero libre para que ocurra "revap"	Reemplazo	0	100	47.2
OV_N.hru	Valor "n" de Manning para flujo laminar	Reemplazo	0	10	6.5
SLSUBBSN.hru	Longitud media de la pendiente	Reemplazo	10	150	95.5
CH_S2.rte	Pendiente media del canal principal	Reemplazo	0	10	1.4
SURLAG.bsn	Tiempo de retardo de la escorrentía superficial	Reemplazo	0.05	24	21.4
SOL_K.sol	Conductividad hidráulica saturada	Relativo	-0.6	0.6	0.5

El proceso de calibración, se enfocó en la reproducción de los flujos altos y bajos, con el fin de poner más interés en la representación de inundaciones y sequías, que son eventos frecuentes en la CSAA. En la Tabla 5.5, se presentan los tres métodos estadísticos cuantitativos usados para valorar el grado de ajuste del modelo SWAT. Estos métodos se calcularon para el periodo de calibración (2006-2011), el periodo de validación (2012-2015) y todo el periodo simulado (2006-2015); no se consideró el periodo de calentamiento. Al calcular los estadísticos se obtuvo valores que oscilaron entre $0.46 < NS < 0.52$, $R^2 \geq 0.5$ y $PBIAS < \pm 16$. De acuerdo con Moriasi et al. (2007), estos resultados indican que el modelo representó de manera aceptable el flujo diario de la cuenca.

Tabla 5.5. Resultados estadísticos entre el caudal diario observado y calculado en la estación Seminario, con el modelo SWAT

Período	Estadísticos	Resultados
Período simulado (2006-2015)	NS	0,5
	R ²	0,5
	PBIAS (%)	3,7
Período de calibración (2006-2011)	NS	0,5
	R ²	0,6
	PBIAS (%)	-16
Período de validación (2012-2015)	NS	0,5
	R ²	0,5
	PBIAS (%)	10

En la Figura 5.9, se muestra el caudal diario para el periodo de calibración, donde el modelo SWAT sobrestima aproximadamente un 16% los caudales observados. En el periodo de validación (Figura 5.10), el caudal observado fue superior al simulado, indicando que el modelo subestimó cerca del 10% los caudales observados.

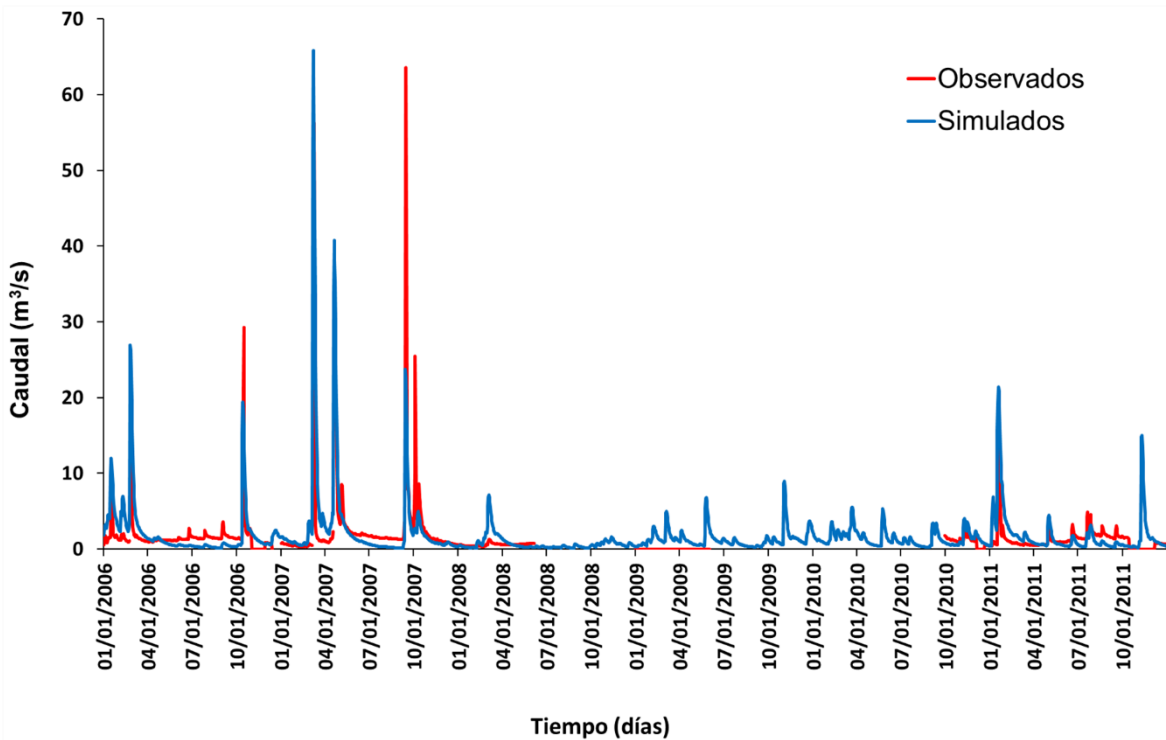


Figura 5.9. Evolución de caudales diarios observados y calculados para el período de calibración (2006-2011)

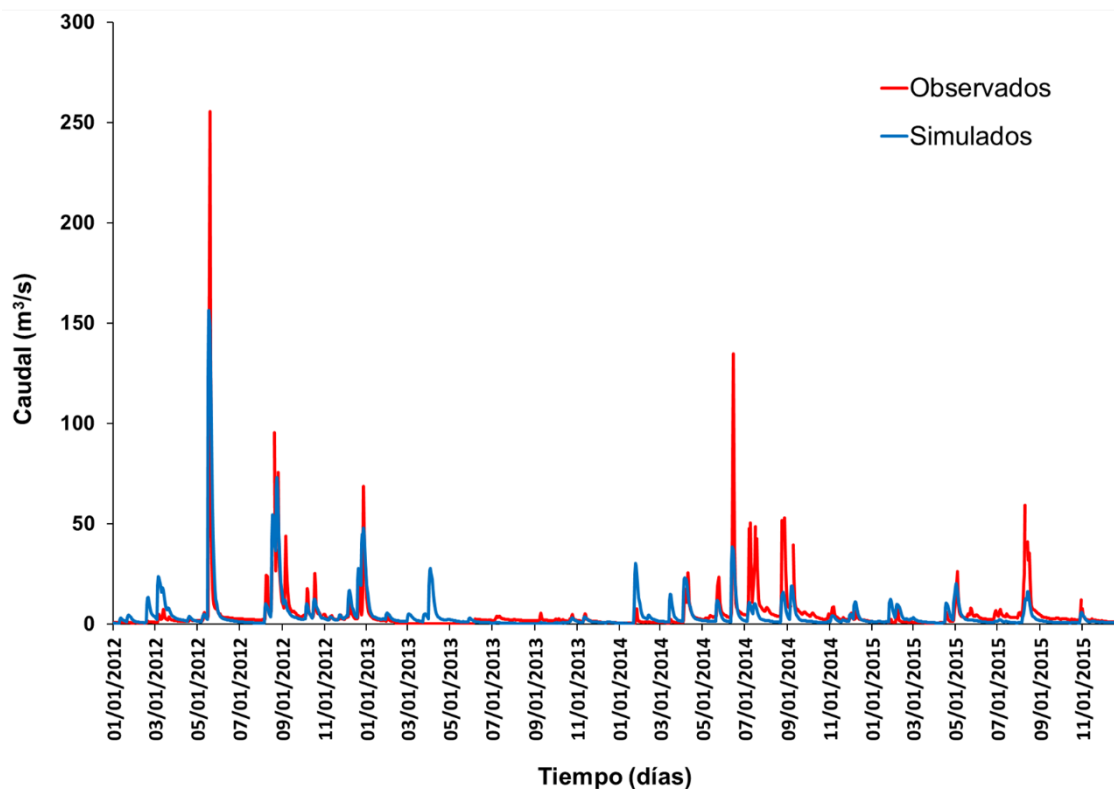


Figura 5.10. Evolución de caudales diarios observados y calculados para el periodo de validación (2012-2015)

5.4 Comparación de balances hídricos

El balance hídrico de la cuenca superior del arroyo Del Azul y de las subcuencas Azul superior, Videla y Santa Catalina, se analizó tanto a escala anual como mensual. A estas dos escalas temporales, se contrastaron los resultados del balance hídrico para los tres escenarios de usos del suelo propuestos. Como se comentó en el capítulo de metodología, el escenario P1 fue el escenario de línea base.

5.4.1 Balance hídrico promedio anual

En la Tabla 5.6, se presenta la comparación de los porcentajes del balance hídrico promedio anual para los tres escenarios propuestos. Conforme a estos resultados, se evidenció que para el periodo simulado los movimientos verticales de agua (evapotranspiración y recarga) dominaron en el balance hídrico de la CSAA; aproximadamente el 94% de la precipitación caída en la cuenca formó parte de estos dos procesos. De acuerdo a los resultados obtenidos, la modificación del uso del suelo a través del tiempo alteró los procesos del balance hídrico, principalmente la escorrentía superficial y la recarga.

Tabla 5.6. Porcentajes del balance hídrico promedio anual de la cuenca superior del arroyo Del azul para los escenarios propuestos

Balance hídrico (%)	P1	P2	P3
Evapotranspiración real	85.4	85.9	85.8
Escorrentía superficial	6.2	5.4	6.3
Recarga	8.4	8.7	7.9

En la Figura 5.11, se presenta la comparación del balance hídrico anual para los escenarios P1, P2 y P3. A grandes rasgos, la respuesta de la evapotranspiración anual no varió de forma representativa para cada escenario de uso del suelo; para el escenario P2, la evapotranspiración aumentó alrededor de 1% y para el escenario P3 cerca del 0.5%. Por otra parte, la escorrentía superficial decreció para el escenario P2 en 14%, pero se incrementó un 5% para el escenario P3. En el caso de la escorrentía subsuperficial, su variación fue casi nula; para el escenario P2 aumentó un 0.2%, mientras para el escenario P3 disminuyó 1%. La recarga presentó incrementos del 5% para el escenario P2 en contraposición del escenario P3, que mostró un decrecimiento del 7%. En cuanto a la humedad del suelo, para los dos escenarios esta variable se redujo; para el escenario P2 en 2% y para el escenario P3 en 3%. El flujo base se incrementó un 6% para el escenario P2, pero decreció 8% para el escenario P3. Por último, el rendimiento hídrico disminuyó 5% para el escenario P2, pero no varió de manera significativa para el escenario P3.

5.4.1.1 Caudales promedio anuales

En la Figura 5.12, se presentan los caudales promedios anuales del periodo simulado para los tres escenarios de usos del suelo. El valor medio de estos caudales para los escenarios P1 y P3, fue de aproximadamente 3 m³/s. Para el escenario P2, los caudales promedios disminuyeron alrededor del 4%, alcanzando una media de 2,8 m³/s. Sin embargo, en los años más secos como el 2008, los diferentes escenarios de usos del suelo no alteraron la respuesta de los caudales. Caso contrario, ocurrió en los años más húmedos como el 2007, 2012 y 2014, los cuales presentaron importantes cambios en el caudal promedio anual.

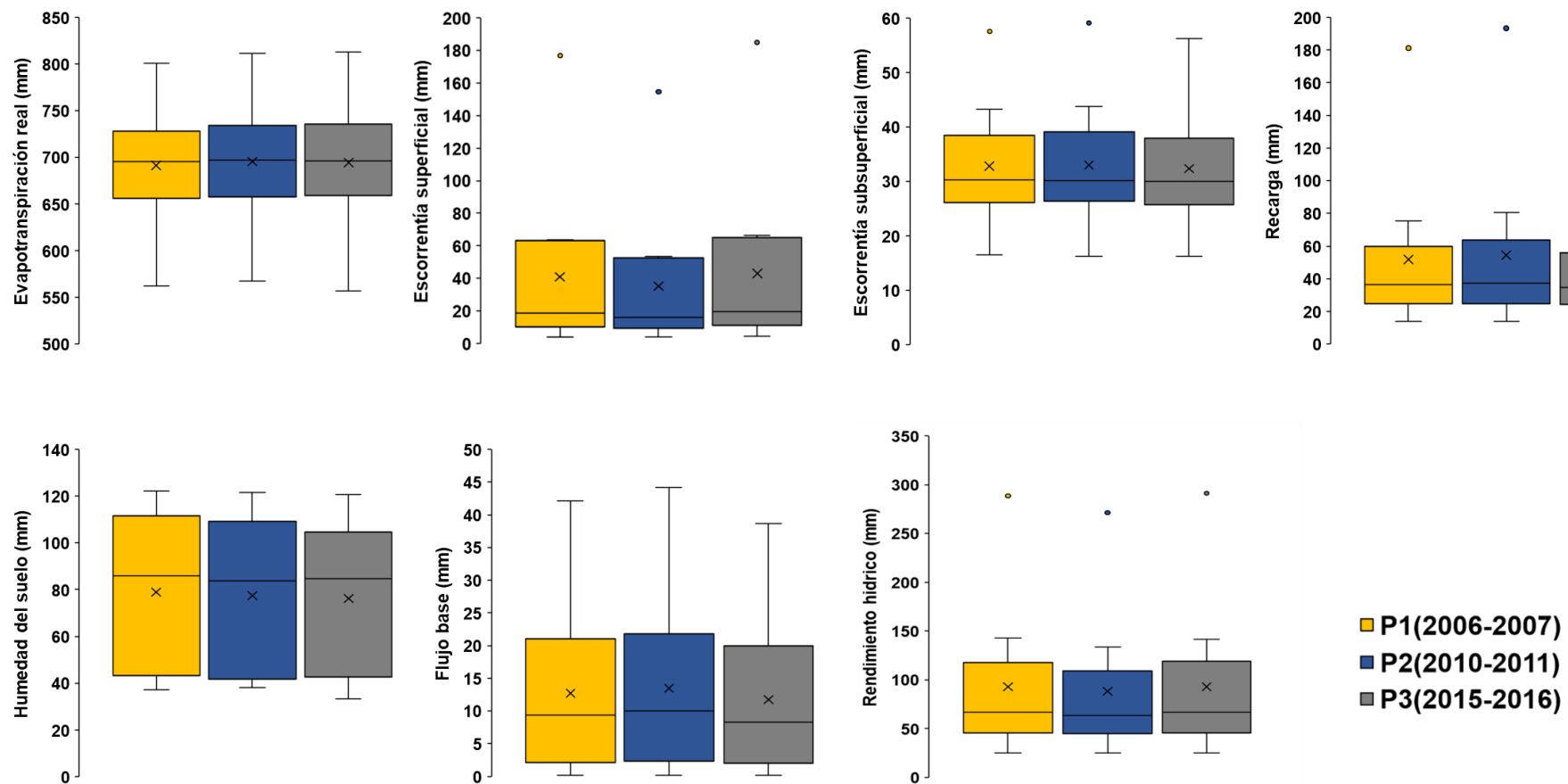


Figura 5.11. Comparación del balance hídrico anual de la cuenca superior del arroyo Del Azul para los escenarios P1, P2 y P3

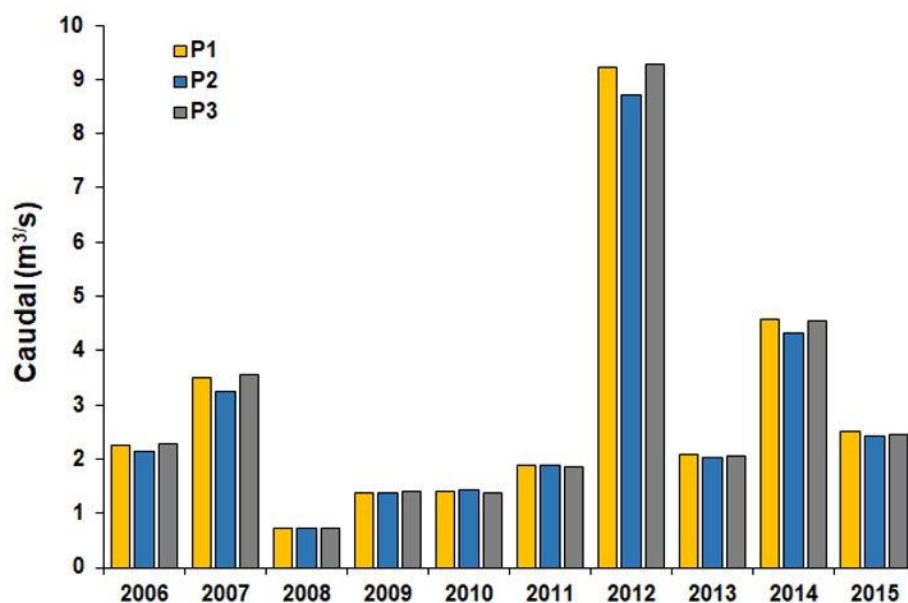


Figura 5.12. Caudales promedio anuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los escenarios P1, P2 y P3.

5.4.1.2 Balance hídrico promedio anual para las subcuencas.

En la Tabla 5.7, se presenta el balance hídrico promedio anual de las subcuencas Azul superior, Videla y Santa Catalina para los tres escenarios de usos del suelo. La respuesta del balance hídrico en cada subcuenca mostró la misma tendencia que el balance hídrico en la cuenca superior del arroyo Del Azul con cada escenario propuesto. Como se muestra en la Tabla 5.7, la escorrentía superficial alcanzó los valores más bajos con el escenario P2, tanto en la cuenca superior del arroyo del Azul como para cada subcuenca. Igualmente, la menor recarga y humedad del suelo se obtuvieron con el escenario P3.

En base a los resultados, se destacó la subcuenca Azul superior por presentar la mayor evapotranspiración real en la cuenca, representando para el escenario P1 aproximadamente el 86% de la lluvia caída en esta subcuenca. Los efectos que los diferentes escenarios tuvieron sobre esta variable no fueron mayores. En cambio, la escorrentía superficial mostró ser uno de los procesos analizados más sensible a los cambios de usos del suelo; para el escenario P2, disminuyó 14% (Azul sup.), 15% (Videla) y 9% (Sta. Catalina), mientras que para el escenario P3 aumentó 5% (Azul sup.), 3% (Videla) y 6% (Sta. Catalina).

La subcuenca Videla, además de presentar la mayor escorrentía superficial para el escenario de línea base (~6%), fue la zona que aportó la mayor recarga, constituyendo alrededor del 12% del agua que precipito en la subcuenca. Para el escenario P2, la recarga se incrementó en 8% (Azul sup.), 2% (Videla) y 3% (Sta. Catalina) para luego decrecer con el escenario P3 en 8% (Azul sup.), 6% (Videla) y 4% (Sta. Catalina).

En cuanto a la humedad del suelo, la subcuenca Azul superior presentó valores más altos que en el resto de la cuenca. La respuesta de esta variable para los distintos escenarios tendió siempre a disminuir; para el escenario P2, en 1% (Azul sup.) y 2% (Videla y Sta. Catalina) y para el escenario P3, en 3% (Azul sup. y Sta. Catalina) y 4% (Videla).

Tabla 5.7. Balance hídrico promedio anual para las subcuencas Azul superior, Videla y Santa Catalina para los tres escenarios de usos del suelo propuestos

Balance hídrico (mm)	Subcuencas									Cuenca superior del arroyo Del Azul		
	Azul superior			Videla			Sta. Catalina			P1	P2	P3
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3			
Precipitación	814,6	814,6	814,6	864,7	864,7	864,7	812,0	812,0	812,0	820,2	820,2	820,2
Evapotranspiración real	699,2	701,2	702,0	678,6	692,8	684,0	660,2	666,9	661,8	691,4	695,5	694,3
Escorrentía superficial	38,7	33,2	40,5	49,9	42,4	51,5	48,0	43,4	50,6	41,0	35,3	42,9
Recarga	42,6	45,8	39,4	99,4	101,7	93,8	64,4	66,2	61,6	51,9	54,4	48,5
Humedad del suelo	80,7	79,6	78,1	75,4	73,9	72,0	75,4	74,0	73,2	78,9	77,4	76,3

5.4.1.3 Balance hídrico espacio-temporal promedio anual

En la Figura 5.13, se muestran los mapas de la CSAA con la variación espacio temporal promedio anual de las principales variables del balance hídrico para los tres escenarios de usos del suelo propuestos. En relación a la evapotranspiración real, los valores que predominaron en la cuenca oscilaron entre 700 y 800 mm. Si bien los cambios de esta variable fueron muy sutiles, para el escenario P2, las zonas con valores que superan los 800 mm fueron más notorias sobre todo al este de la subcuenca Santa Catalina y al norte de la subcuenca Videla, donde hay presencia de suelos alcalinos hidromórficos. Este mismo rango de evapotranspiración (>800 mm), se observó para los escenarios P1 y P3 al sur de la cuenca, donde se forman bajos y lagunas. En los sectores donde predominan las pasturas y pastizales naturales, es decir, al norte, sur y gran parte de la subcuenca Videla, la evapotranspiración osciló entre 700 mm y 600 mm. La evapotranspiración más baja, menor a 500 mm, se presentó principalmente en la región de afloramientos rocosos del sistema de Tandilia.

La mayor escorrentía superficial (>100 mm) para los tres escenarios de usos del suelo, se presentó en los sectores del sistema de Tandilia. Por el contrario, los valores de escorrentía superficial más bajos (< 20mm) se observaron principalmente en la cuenca baja, donde prevalecen las pendientes menores al 3%. Estos bajos volúmenes de escorrentía superficial, fueron los que predominaron a lo largo de la CSAA para el escenario P2. En cambio, para los escenarios P1 y P3, presentaron variaciones promedio entre 20-40 mm.

En cuanto a la recarga, se encontró que para los tres escenarios de usos del suelo los valores más altos (> 150 mm) se presentaron hacia la cuenca alta, donde el terreno está constituido principalmente por depósitos de sedimentos permeables con alta porosidad primaria. Además, sólo para el escenario P2, los altos valores de recarga abarcaron gran parte de las zonas de piedemonte

y afloramientos rocosos. Por otro lado, se hizo una clasificación general del porcentaje de recarga que predominó en los diferentes sectores de la cuenca, determinando que, en la cuenca alta la recarga fue superior al 15%, en la llanura de transición varió de 10% a 15%, en la cuenca media de 2% a 5% y hacia la cuenca baja generalmente se recargó entre el 5% y 10%.

Para los tres escenarios propuestos, la humedad del suelo más baja (<45 mm) se presentó principalmente al norte y sur de la CSAA, mientras que los valores más altos (>130 mm) se encontraron en su mayoría al noreste de la subcuenca Santa Catalina. Como se observa en la Figura 5.23, hacia el centro de la cuenca se muestran grandes variaciones de la humedad del suelo para los diferentes escenarios. Para el escenario P1, el rango que predominó en esta zona osciló entre 130-180 mm, para el escenario P2, se presentaron variaciones entre 95-130 mm y para el escenario P3, se observaron rangos entre 45-95 mm.

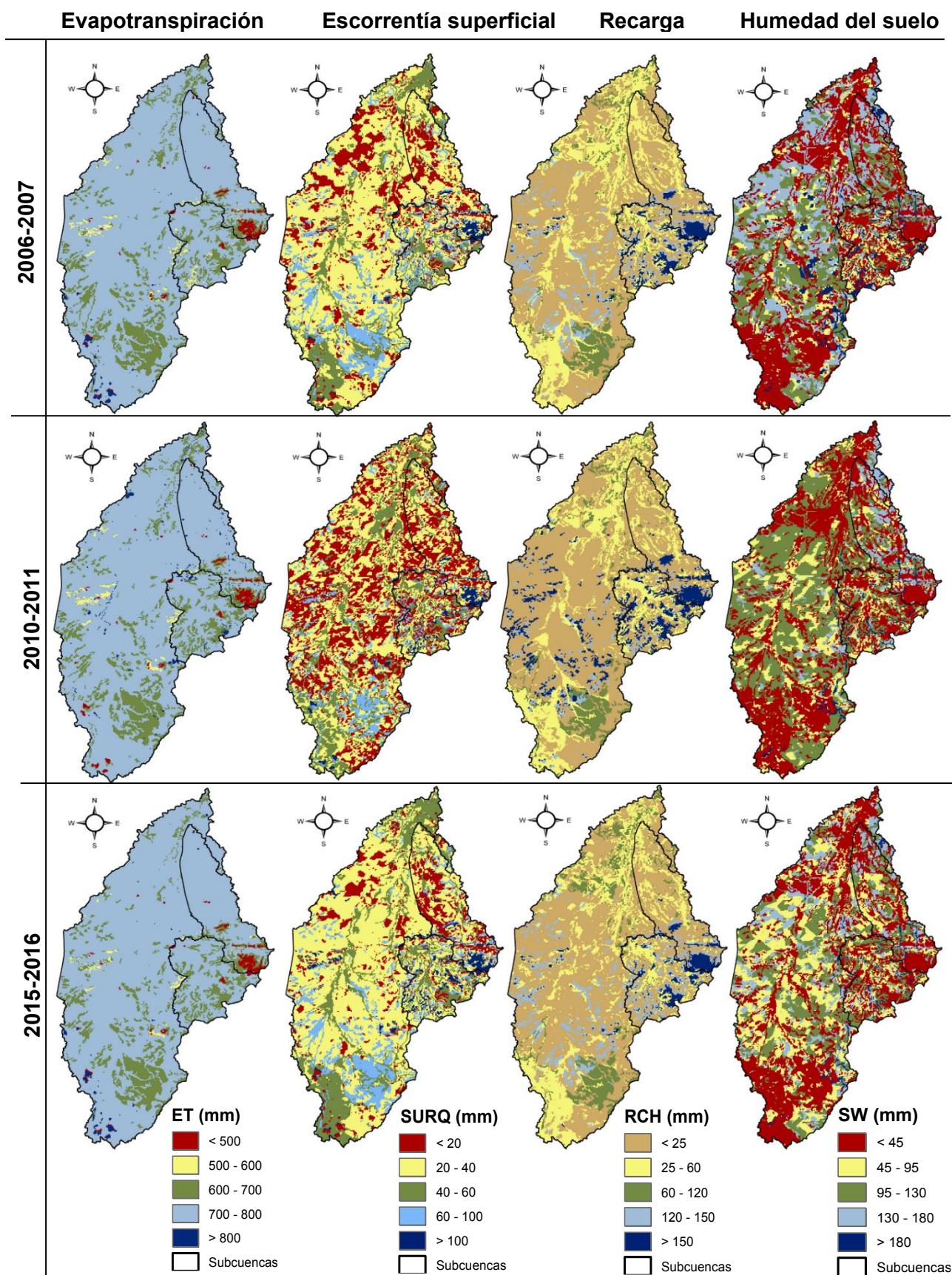


Figura 5.13. Variación espacio-temporal del balance hídrico promedio anual en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los escenarios P1, P2, y P3

5.4.2 Balance hídrico promedio mensual

En la Figura 5.14, se compara el balance hídrico promedio mensual de la CSAA para los escenarios propuestos. De acuerdo a los resultados obtenidos en el periodo simulado, las mayores tasas de evapotranspiración se presentaron en los meses de primavera, alcanzando valores máximos en el mes noviembre (89 mm). Por el contrario, la evapotranspiración más baja se presentó en otoño con valores por debajo al promedio (57,6 mm). En general, y al igual que a escala anual, la variación de la evapotranspiración promedio mensual para cada escenario de uso del suelo fue mínima. Sin embargo, para el escenario P2, esta variable aumentó aproximadamente 2% a inicios de verano. En cambio, para el escenario P3, el aumento fue casi del 4% pero a finales de primavera.

En cuanto a la escorrentía superficial, los valores más altos se presentaron a fines de veranos e inicios de otoño, cuando el suelo se encuentra principalmente descubierto debido a la temporada de cosecha de cultivos de soja y maíz. Además, en los meses de mayo y agosto, la escorrentía superficial presentó volúmenes bastante superiores al promedio como consecuencia al alto aporte pluviométrico de esos meses. Así mismo, en junio y julio, que fueron los meses más secos, se obtuvo la más baja escorrentía superficial. Al comparar la respuesta de esta variable con cada escenario de usos del suelo, se encontró que para el escenario P2 la escorrentía superficial decreció aproximadamente 14%, mientras que para el escenario P3, se incrementó alrededor del 5%. Cabe destacar que, en temporadas más húmedas, los diferentes escenarios de usos del suelo causaron una mayor variación en la respuesta de la escorrentía superficial.

La escorrentía subsuperficial, mostró en general una baja influencia de los diferentes escenarios de usos del suelo en su respuesta mensual. Para el escenario P2, se presentaron aumentos casi del 2% solo en los meses de invierno. En cambio, para el escenario P3, esta variable disminuyó en todos los meses cerca del 1%. Como se muestra en la Figura 5.24, los valores más altos de escorrentía subsuperficial ocurrieron en época de verano y a inicios de otoño.

En promedio, la recarga fue mayor en verano. Sin embargo, los valores más altos ocurrieron principalmente en agosto. El efecto que causaron los diferentes escenarios de usos del suelo en la repuesta de esta variable, fue mayor en los meses de invierno. Para esta época, la recarga para el escenario P2 aumentó alrededor de 9% y, para el escenario P3, se redujo cerca del 7%. Los meses en que la humedad del suelo fue más sensible a los cambios de cobertura, fueron diciembre, enero y febrero. En estos meses, la humedad del suelo para el escenario P2 se redujo alrededor del 3% y, para el escenario P3, aproximadamente 5%. Por otro lado, la mayor humedad del suelo se presentó en otoño, siendo junio el mes que reportó los valores más altos.

Respecto al flujo base, los valores más altos se registraron en verano y en el mes de agosto, mientras que, los valores más bajos en los meses de junio y septiembre. En general, esta variable para el escenario P2, mostró incrementos cercanos al 5%. En cambio, para el escenario P3, se vieron reducciones de aproximadamente 7%. La época que resultó ser más sensible a los cambios de usos del suelo fue verano, presentando un aumento del 10% para el escenario P2 y descensos del 11% para el escenario P3.

Finalmente, el rendimiento hídrico de la cuenca presentó en promedio valores superiores a finales de verano y comienzos de otoño. Su respuesta para el escenario P2, disminuyó aproximadamente 6% respecto al escenario de línea base, en cambio, para el escenario P3 aumentó en 1%.

5.4.2.1 Caudal promedio mensual

En la Figura 5.15, se presentan los caudales promedios mensuales del periodo simulado para los tres escenarios de usos del suelo propuestos. Por lo general, a principios de invierno y en primavera los caudales no superan la media mensual de 3 m³/s. Sin embargo, los meses de junio y julio, fueron los más secos del año, alcanzando menos de 2 m³/s al mes. Por otro lado, en verano y a inicios de otoño, se presentaron los caudales más altos, siendo mayo el mes que presenta las mayores tasas de descarga.

5.5 Susceptibilidad de los usos del suelo ante inundaciones y sequías

En el periodo simulado ocurrieron eventos extremadamente húmedos y secos. El año 2008 se caracterizó por presentar una baja precipitación de 574,7 mm/año, de los cuales se evapotranspiró 564,2 mm/año (cerca del 98% del total precipitado), llevando a la CSAA a un estado de sequía. Por el contrario, el año más húmedo fue el 2012 con una precipitación de 1315,7 mm/año, de los cuales 176,8 mm formaron parte de la escorrentía superficial (aproximadamente el 13% de la precipitación total caída en este año), produciendo tres inundaciones importantes en la cuenca.

En la Figura 5.16, se presentan los caudales máximos promedio que se alcanzaron en cada año del periodo simulado para los tres escenarios propuestos. La respuesta de los caudales máximos o pico para cada escenario de uso del suelo, varió en mayor medida en años más húmedos como el 2007, 2012 y 2014. En el año 2007, el caudal pico máximo para el escenario de línea base fue de aproximadamente 66 m³/s, volumen que para el escenario P2 disminuyó el 14%. En cambio, para el escenario P3 se incrementó 4%. En el caso del año 2012, el caudal pico máximo simulado fue de 156,3 m³/s. Para el escenario P2, este caudal disminuyó 8% a diferencia del escenario P3, que aumentó 1%. En 2014, el caudal pico máximo simulado fue de aproximadamente 39 m³/s, decreciendo con el escenario P2 el 9% mientras que, para el escenario P3 aumentó el 1%.

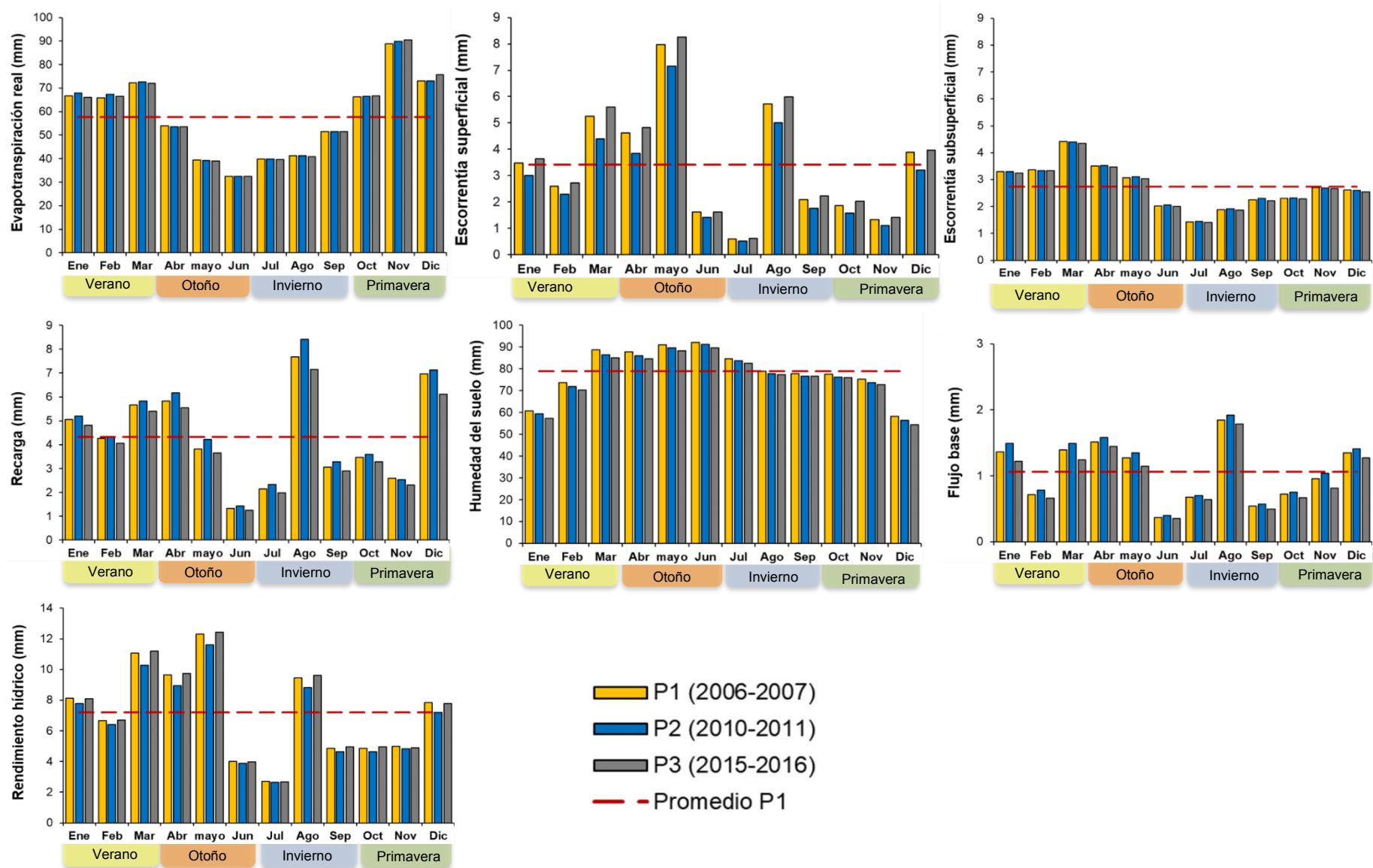


Figura 5.14. Balance hídrico promedio mensual simulado para el periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.

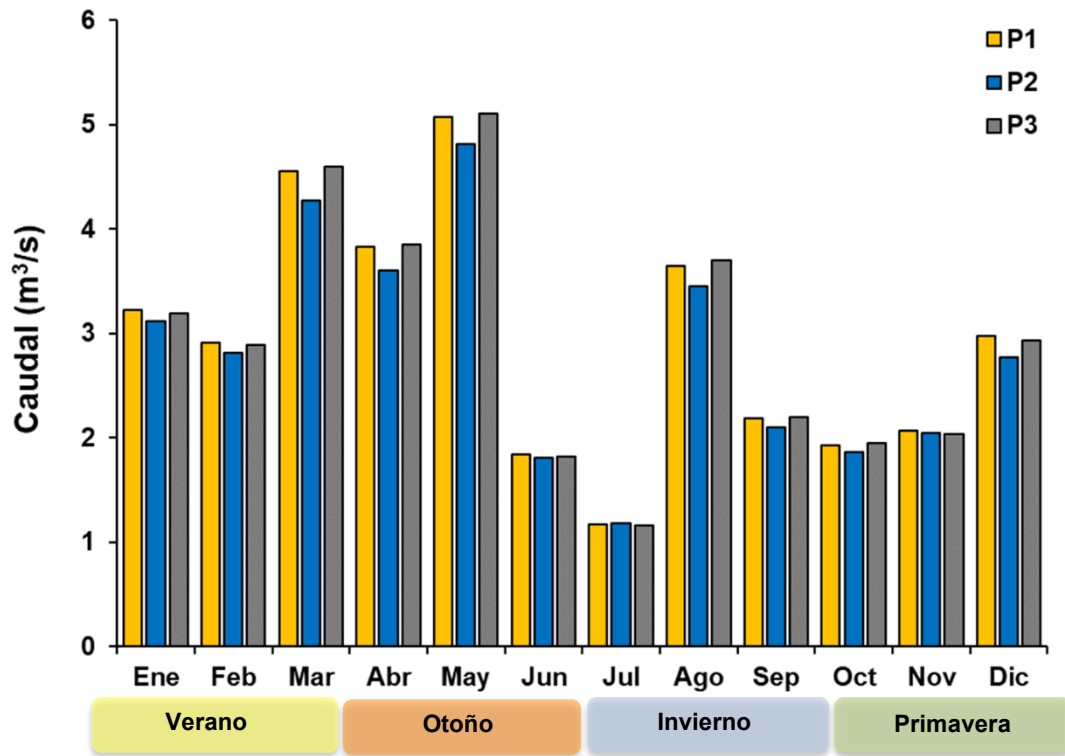


Figura 5.15. Comparación de los caudales promedio mensuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los escenarios P1, P2 y P3.

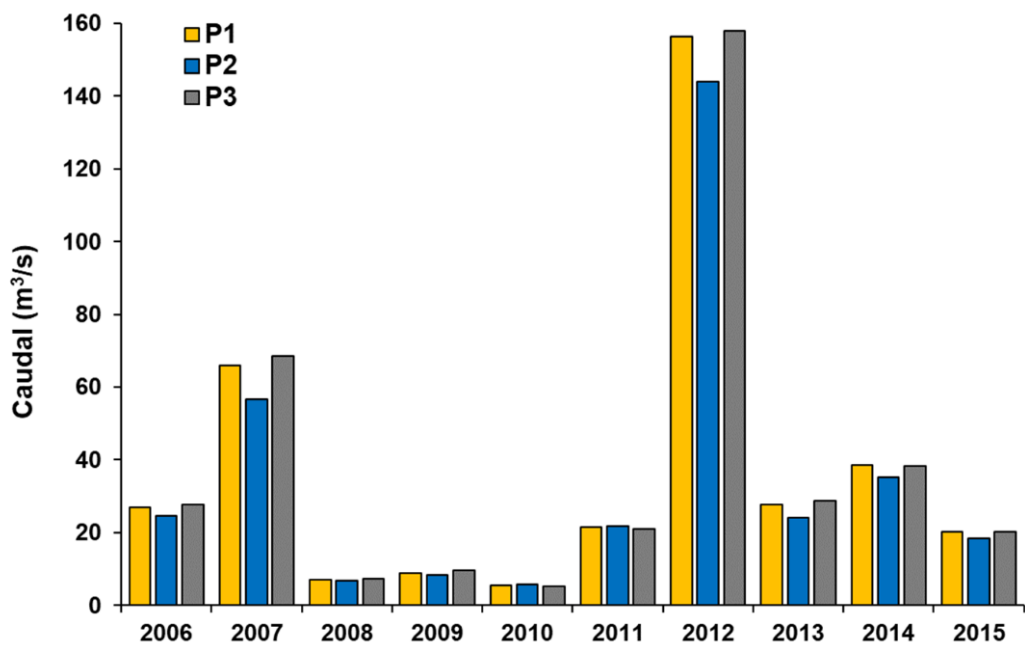


Figura 5.16. Comparación de los caudales pico promedio anuales del periodo 2006-2015 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los escenarios P1, P2 y P3.

En la Figura 5.17, se comparan los balances hídricos de los años 2008 y 2012 para los escenarios P1, P2 y P3. Para el año 2008, las variables que determinaron la magnitud del déficit hídrico fueron principalmente la evapotranspiración y la humedad del suelo. De acuerdo a los resultados para este año, la primavera fue la época más seca del año. Si bien, no fue la temporada con menor aporte pluviométrico, si fue la que evidenció mayor déficit hídrico por la alta evapotranspiración y la baja humedad del suelo. No obstante, para el escenario P1, la respuesta de la evapotranspiración fue 1% más baja que para los escenarios P2 y P3. En cuanto a la humedad del suelo, esta variable incrementó cerca del 6% respecto al escenario P2 y, aproximadamente 7% respecto al escenario P3. Por lo tanto, los usos del suelo presentes en el escenario P1, ayudaron a que el déficit hídrico de primavera sea menos severo.

En el caso del año 2012, ocurrieron 3 inundaciones, una en mayo y dos contiguas en el mes de agosto. Para el mes de mayo, la precipitación fue de aproximadamente 194,1 mm, de los cuales, se escurrieron superficialmente alrededor del 36% y se recargaron cerca del 10% del total precipitado. Sin embargo, para el escenario P2 la escorrentía superficial decreció 10% y la recarga aumentó 17%. En cambio, para el escenario P3, la escorrentía superficial se incrementó 3% y la recarga disminuyó 6%. En este sentido, con los usos del suelo presentes en el escenario P2 la magnitud de las inundaciones en la temporada de otoño se reduciría, dado que esta temporada es la más propensa a los anegamientos debido a la baja recarga y alta escorrentía superficial. Por otro lado, en la temporada más lluviosa (invierno) el mes de agosto presentó una precipitación de 243,8 mm, (casi el doble que en mayo) de los cuales, se escurrieron superficialmente alrededor del 20% y se recargaron cerca del 22%. Al calcular estas variables con el escenario P2, se obtuvo un descenso del 11% en la escorrentía superficial y un aumento del 10% en la recarga. Por el contrario, para el escenario P3, la escorrentía superficial incremento en un 5% y la recarga decreció 8%. Con estos resultados, se confirma una vez más que las condiciones de usos del suelo y/o coberturas presentadas en el escenario P2 disminuye el volumen de agua que se mueve en superficie.

P1
 P2
 P3
 PP

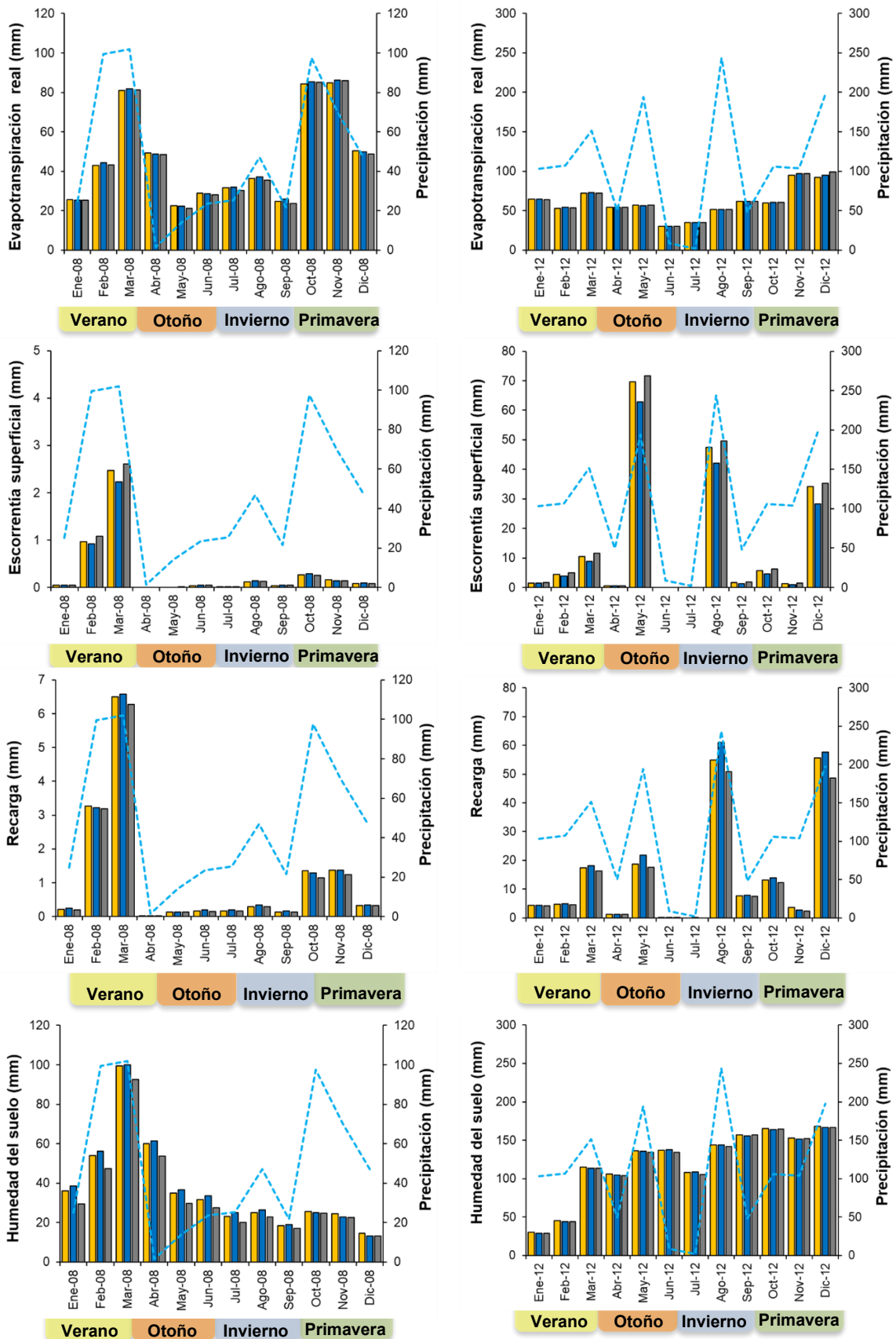


Figura 5.17. Comparación del balance hídrico mensual para los años 2008 y 2012 en la cuenca superior del arroyo Del Azul para los tres escenarios propuestos.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

A partir de la metodología basada en imágenes NDVI del sensor MODIS-Terra, se realizó la caracterización de coberturas y usos del suelo de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Los mapas resultantes representaron con un nivel de certidumbre aceptable el esquema agrícola de la cuenca, evidenciando como el cultivo de soja aumentó de forma acelerada a expensas de territorio ocupado por otras coberturas, principalmente pasturas y pastizales naturales. Del periodo 2006-2007 al 2015-2016, el cultivo de soja en la CSAA aumentó alrededor de un 280%, mostrando una intensificación en su producción a partir de la campaña 2010-2011. Estos resultados coinciden con los de Vázquez et al. (2016), quienes mostraron un segundo flujo expansivo del cultivo de soja para el año 2011; el primero ocurrió a mediados de la década del noventa, donde todo el partido de Azul experimentó un crecimiento agrícola potenciado por la implementación de la soja transgénica. Para el periodo 2015-2016, los cultivos de soja y trigo-soja cubrieron cerca del 72% de la superficie de la cuenca, el 11% fue cubierto por pasturas y pastizales naturales y alrededor del 10% por cultivos de invierno y maíz. Estos porcentajes de ocupación son muy similares a los valores presentados por Guevara Ochoa et al., (2018) para la campaña 2015-2016, quienes además desarrollaron la metodología empleada en este trabajo.

El proceso de agriculturización que presenta la CSAA sigue la misma tendencia de la región pampeana (Pruel et al., 2005; Aizen et al., 2009; Barral y Maceira, 2012) e incluso Sudamérica (Baldi et al., 2006; Ybran y Lacelli, 2016), donde el uso del suelo evoluciona constantemente hacia una intensificación en la producción de granos altamente rentables como la soja (FAO, 2012), propiciando la simplificación del paisaje agrícola. Si bien la agricultura es una de las actividades que más aporta a la economía del país (FAOSTAT, 2018), su expansión ha avanzado con prácticas repetitivas sin medidas conservacionistas, llegando hasta tierras más frágiles y anegables (Vázquez et al., 2016) haciendo que la resistencia de la región ante eventos de inundaciones y sequías disminuya. A continuación, se discute en primer lugar el impacto que los cambios en el uso del suelo causaron en el balance hídrico de la CSAA para los tres periodos propuestos. Posteriormente, se señalan algunas limitaciones e incertidumbres a tener en cuenta en la caracterización del uso del suelo y la simulación de procesos hidrológicos a través del modelo SWAT.

Impacto de los cambios en el uso del suelo en la respuesta espacio temporal del balance hídrico

Dado que la CSAA posee características típicas de una zona de llanura, los movimientos verticales de agua como la evapotranspiración y la recarga fueron los que dominaron en el balance hídrico, representando cerca del 94% de la precipitación promedio anual caída en la cuenca. Asimismo, al contrastar los resultados del balance hídrico calculado por el modelo SWAT para los tres escenarios

propuestos, se encontró que los procesos hidrológicos de la CSAA presentaron principalmente alteraciones en la escorrentía superficial y la recarga. Caso contrario ocurrió con la evapotranspiración real y escorrentía subsuperficial, los cuales a grandes rasgos mostraron poca variación en su respuesta con cada escenario de uso del suelo propuesto.

Para explicar el motivo de la poca variación en la respuesta de la evapotranspiración, se recurre al concepto del dosel vegetal o canopia, el cual es una de las propiedades de las plantas que influye principalmente en los procesos de evapotranspiración, escorrentía superficial, humedad del suelo y recarga (Larbi et al., 2020; Twisa et al., 2020). La cantidad máxima de agua que se intercepta en el dosel para su posterior evaporación, es una función del Índice del Área Foliar (IAF), siendo este índice menor en los pastizales naturales que en los cultivos y bosques (Hyandye et al., 2018; Twisa et al., 2020). Según Badano (2010) y Altesor et al. (2010), la evapotranspiración es sensible al IAF, por lo que a medida que aumenta este índice, aumenta linealmente el consumo de agua de las plantas hasta alcanzar el valor que produce la cobertura casi total del suelo, una vez esto sucede, los incrementos del área foliar producen alzas en la tasa de evapotranspiración poco sustanciales. En otras palabras, el IAF no contribuye al aumento de la evapotranspiración real más allá de su valor potencial. Sin embargo, al disminuir el IAF la respuesta de la evapotranspiración real es levemente más notoria. Por ejemplo, una disminución del 50% en el IAF produciría un descenso del 2% de la evapotranspiración (Badano, 2010). En este sentido, los resultados de la evapotranspiración real calculados por el modelo SWAT, coinciden con las conclusiones de los investigadores anteriormente citados, siendo la evapotranspiración del escenario P1 (escenario con un 27% más de pasturas y pastizales naturales) un 1% menor en relación al escenario P2 (escenario con mayor diversidad de cultivos). A pesar que el escenario P3 registró mayor área ocupada por cultivos, la gran cantidad de superficie cubierta por el monocultivo de soja, conllevó a que en época de cosecha se generará menor evapotranspiración, reduciendo su valor promedio anual. Aun así, la evapotranspiración para este escenario fue 0,5% mayor en comparación al escenario P1. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Hyandye et al. (2018), Larbi et al. (2020) y Guevara Ochoa (2019), quienes igualmente registraron menor evapotranspiración en suelos con pasturas y pastizales naturales y mayor en zonas con cultivos.

En cuanto a la evapotranspiración promedio mensual, fue más alta a finales de primavera (alrededor de 81 mm), cuando gran parte de los cultivos entran en su etapa de maduración, evapotranspirando la mayoría de agua precipitada en esta época, lo cual hace que estos meses (noviembre y diciembre) sean más propensos al déficit hídrico. En cambio, la evapotranspiración más baja (aproximadamente 36 mm) se presentó en mayo, junio y julio, temporada en que senescen y se cosechan los principales cultivos de secano (soja, maíz y trigo-soja). Estos resultados concuerdan con los expuestos por Guevara Ochoa (2019), quien además señaló que debido a la extensión de

suelo descubierto cuando se realizan las cosechas y a la baja evapotranspiración en los periodos de otoño e invierno, hay mayor tendencia a que se presenten inundaciones para estas épocas en la CSAA. En este sentido, es indispensable tener en cuenta que a pesar que los cambios de evapotranspiración sean sutiles, estos afectan significativamente la cantidad de agua que circula en superficie (Hutchins et al., 2018).

Con ayuda del modelo SWAT fue posible analizar la influencia de la cobertura vegetal en los procesos hídricos cuando ocurren eventos de inundaciones y sequías. Además de la evapotranspiración, variables como la escorrentía superficial, la recarga y la variación del nivel de agua subterránea, resultan indispensables para determinar la magnitud de una inundación, así como la humedad del suelo y la evapotranspiración para determinar la magnitud de una sequía. De acuerdo a los resultados obtenidos con el escenario P2, que además de producir un aumento del 1% en la evapotranspiración, presentó un incremento del 5% en la recarga y una reducción del 14% en la escorrentía superficial respecto al escenario de línea base (P1), se podría afirmar que el impacto de las inundaciones en la CSAA disminuye al tener mayor diversidad de coberturas. Estos resultados coinciden con los valores obtenidos por Larbi et al. (2020), quienes a partir del valor de número de curva SCS (CN) utilizado por el modelo SWAT para calcular la escorrentía superficial, concluyeron que una superficie descubierta o con pastizales naturales, presenta mayor escorrentía superficial y menor recarga que un territorio con vegetación mixta o bosques. Por otro lado, al analizar con que escenario de usos del suelo la magnitud de las sequías fue menor, se observó que con el escenario P1 se obtuvo el menor porcentaje en la componente de evapotranspiración y mayor en la de humedad del suelo. Una de las características de este escenario es que posee gran cantidad de superficie cubierta por pasturas y pastizales naturales (23,7%) y por el sistema de doble cultivo trigo-soja (36%). Si bien el doble cultivo trigo-soja implica un uso más intensivo de la tierra, también aporta mayor cobertura durante todo el año, ya que el trigo crece durante invierno y primavera y la soja durante el verano, inmediatamente después de la cosecha del trigo. Este tipo de prácticas agrícolas donde se asocian diferentes cultivos sirven como estrategia para mantener y aumentar la humedad del suelo por periodos más prolongados (Shaxson y Barber, 2008), ya que permiten una cobertura más abundante y rápida, aportando mayor cantidad de rastrojo y residuos, los cuales incrementan el porcentaje de materia orgánica del suelo favoreciendo su fertilidad y previniendo que las plantas sean propensas al estrés hídrico a los pocos días de tiempo seco. En cuanto a las pasturas y pastizales naturales, este tipo de coberturas ayuda a preservar la humedad del suelo (Altesor et al., 2010), dado a que son perennes, consumen poca agua y por lo tanto su evapotranspiración es más baja que otras coberturas vegetales presentes en la cuenca. Además, la humedad del suelo es una de las variables más influyentes en el rendimiento de los cultivos, de hecho, su buen manejo haría más sostenible la producción de alimentos (Shaxson y Barber, 2008).

Es importante tener en cuenta que variables como la recarga tiene una fuerte correlación con la precipitación (Varni et al., 2014). Por lo tanto, el hecho de que esta variable aumente no siempre garantiza menor severidad de las inundaciones, ya que, si al momento de ocurrir un gran aporte pluviométrico el nivel freático se encuentra cercano a la cota del terreno, el nivel de agua subterránea aumentará hasta la superficie y lo hará con mayor velocidad si la recarga es alta, provocando graves inundaciones y anegamientos por largos periodos de tiempo, generando graves problemas económicos y sociales (Guevara-Ochoa, 2019). Por este motivo y sabiendo que los eventos de extremos hídricos son influenciados por la precipitación y la variación del nivel freático, es indispensable tener en cuenta que en sistemas de llanuras es necesario implementar la modelación hidrológica superficial y subterránea de manera acoplada, considerando la calibración tanto de flujos superficiales como subterráneos, para así, representar adecuadamente periodos húmedos y secos (Guevara-Ochoa, 2019). De esta forma, la gestión hídrica y las prácticas agrícolas serían más acordes a la problemática ambiental actual y a la respuesta de los sistemas ecológicos, entendiendo que estos no responden a límites políticos sino a la dinámica de los factores climáticos y de usos del suelo.

Limitaciones en la caracterización de usos del suelo y del modelo hidrológico

Este estudio contó con algunas limitaciones debido al grado de incertidumbre de la información de entrada al modelo y a la simplificación del modelo conceptual representado por el modelo hidrológico en sí. Respecto a la información de entrada, la falta de disponibilidad de datos relacionados a la heterogeneidad espacio-temporal de los usos del suelo, provocó errores por omisión y/o inclusión en la clasificación de curvas estacionales debido a la similitud de algunos patrones temporales. Por ejemplo, para el periodo 2006-2007, el sistema de doble cultivo trigo-soja presentó un 11,4% de errores por omisión asociados al cultivo de soja y un 8% de errores por inclusión asociados a las pasturas y pastizales naturales. Estos errores pueden haber ocurrido en la digitalización de los polígonos usados como datos de campo o por la variabilidad en el estado vegetativo de los cultivos, clasificando incorrectamente algunos píxeles (Guerschman, 2005). Sin embargo, el grado de acierto que se alcanzó con esta metodología fue suficientemente satisfactorio y podría aportar información útil para el desarrollo de nuevas estrategias para el manejo sostenible de los recursos naturales, brindando además mayor eficacia en el monitoreo del avance de la frontera agrícola. Asimismo, Guevara-Ochoa et al. (2018) señalan que esta metodología es replicable, rápida y necesita pocos insumos para su aplicación, logrando hacer un seguimiento casi en tiempo real de los cambios de cobertura.

Al simular procesos del balance hídrico con el modelo SWAT se presentan ciertas limitaciones al igual que con otros modelos semidistribuidos. Una de las principales limitaciones de este modelo, es la parametrización excesiva y la equifinalidad, lo que significa que la misma salida del modelo

puede resultar de diferentes combinaciones de parámetros. Debido a esta desventaja, Du et al. (2013) proponen establecer una relación entre los valores de los parámetros y las características fácilmente observables de la cuenca, de esta forma la parametrización de escenarios de usos del suelo será más realista, logrando una predicción del impacto más precisa. Asimismo, SWAT realiza simplificaciones relacionadas con la estructura del modelo, dado que este responde en cierta medida a la simplificación hecha del sistema real (Havrylenko et al., 2013), como en el caso del flujo saturado, en el cual SWAT lo simula directamente como un reservorio lineal cuando el gradiente en acuíferos no confinados es no lineal (Bailey et al., 2020), esto significa que la descarga de agua subterránea es proporcional al almacenamiento de agua subterránea (Wang y Brubaker, 2014). Es importante tener en cuenta que el modelo SWAT maneja discontinuidad espacial de las HRU (Guevara Ochoa, 2019), es por esto que siempre se necesitan hacer ciertas suposiciones al relacionar cada una de las unidades, principalmente en la fase subterránea que es donde se maneja mayor incertidumbre, ya que la naturaleza interna semidistribuida del modelo SWAT no permite el flujo de agua subterránea entre HRUs (Guevara Ochoa et al., 2020). Además, SWAT no considera en la ecuación del nivel freático los movimientos ascendentes del agua por evapotranspiración en la zona saturada, por lo que no cuantifica adecuadamente la fluctuación del nivel freático en sistemas que presentan aguas subterráneas someras (Melaku y Wang, 2019). Si bien, el agrupamiento de las HRU acelera el tiempo de cálculo del balance hídrico, al no haber conexión entre estos agrupamientos, variables como el nivel freático presenta baja exactitud, haciendo que se subestime futuros valores de otras variables como la humedad del suelo y la escorrentía superficial (Guevara Ochoa, 2019).

En síntesis, los resultados obtenidos mostraron la relevancia de los usos del suelo en el comportamiento hidrológico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Los cambios ocurridos en la cobertura vegetal se mostraron como un proceso continuo de gestión agrícola adaptativa a muchos factores, entre ellos los avances tecnológicos, el cambio de las fuerzas del mercado y la mejora de la gestión de plagas y fertilizantes. Asimismo, fue posible analizar la influencia de la cobertura vegetal en épocas de sequías e inundaciones, dando nociones de la importancia de los usos del suelo para mitigar el impacto de los eventos hídricos extremos en zonas de llanuras. Además, quedó claro que la respuesta hidrológica a los cambios de usos del suelo no es lineal y muestra un efecto de umbral (Ghaffari et al., 2010). Es decir, que la cantidad mínima de cambios que debe ocurrir en un tipo de cobertura para que ocurra una alteración en la escorrentía superficial, será muy diferente al umbral de cambios para alterar la recarga; del mismo modo sucede con los otros procesos hidrológicos. Finalmente, es necesario un mejor seguimiento en la evolución de los usos del suelo, de esta forma se reduciría la incertidumbre en el modelado.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

La metodología usada para caracterizar usos del suelo a partir de firmas fenológicas derivadas de series temporales de NDVI MODIS-Terra producto MOD13Q1, con imágenes Landsat 7 y 8, permitió discriminar con muy buena precisión las diferentes coberturas para los tres periodos estudiados. La fusión de imágenes de media resolución por medio de clasificaciones no supervisadas y supervisadas, ha resultado ser una herramienta bastante efectiva para el mapeo regional de los usos del suelo como también para su monitoreo en tiempo real.

Los mapas de usos del suelo generados para los periodos 2006-2007 (P1), 2010-2011 (P2) y 2015-2016 (P3), han permitido analizar la tendencia espacio-temporal en que ocurrieron los diferentes cambios. Conforme al mapa del escenario de línea base o P1, se identificó que el sistema de doble cultivo trigo-soja fue el uso del suelo predominante en la cuenca superior del arroyo del Azul para la campaña agrícola 2006-2007. La ocupación de este cultivo alcanzó aproximadamente el 36% del territorio, principalmente en los sectores con pendientes de 3-6%. Además, en este escenario se encontró el mayor porcentaje de área cubierta por pasturas y pastizales naturales (23,7%) cubriendo principalmente la zona norte de la cuenca. Los cultivos de invierno, maíz y de girasol abarcaron cerca del 25% de la superficie agrícola para este periodo estudiado.

En cuanto al mapa del escenario P2, los cultivos de soja, maíz y pasturas y pastizales naturales, lograron cubrir más del 50% de la zona de estudio ocupando porcentajes similar entre sí. Si bien el cultivo de trigo-soja se redujo en casi un 23% en relación al escenario P1, continuó siendo el uso del suelo más abundante en el escenario P2, cubriendo el 27,5% del territorio destinado a uso agrícola. Este sistema de doble cultivo fue reemplazado en su mayoría en la zona central de la cuenca, principalmente por cultivos de soja, los cuales aumentaron en un 92% en relación al escenario P1. La mayoría de las transformaciones ocurrieron en los sectores de serranía y al norte de la cuenca, trayendo como consecuencia reducciones del área destinada a otras coberturas, en especial de pasturas y pastizales naturales, las cuales decrecieron 27% principalmente al norte de la cuenca, donde la pendiente es más suave y plana y solía predominar el pastoreo.

A diferencia del escenario P1 y P2, el escenario P3 presentó como uso del suelo predominante el cultivo de soja, cubriendo el 37,3% de la superficie de la cuenca. El aumento de este cultivo ocurrió de forma acelerada a lo largo de toda la cuenca, alcanzando un incremento del 280% respecto al escenario de línea base. Además, se ha identificado que la ocupación de cultivos de soja y trigo-soja ascendió a más del 70% en este escenario y, en consecuencia, cultivos como el de maíz y las pasturas y pastizales naturales fueron los más reemplazados, disminuyendo su cobertura en el transcurso de 10 años en aproximadamente 67% y 52% respectivamente. Con la caracterización de los usos del suelo para los tres periodos propuestos, se pudo evidenciar como

el proceso de agriculturización en la zona de estudio ha mostrado la misma tendencia a la homogenización del paisaje agrícola de la región Pampeana, donde la prioridad son los cultivos altamente rentables como los de secano.

De acuerdo a los resultados en el proceso de análisis de sensibilidad, se encontró que los parámetros que mostraron mayor repercusión en el ajuste del modelo fueron, la longitud de la pendiente (SLSOIL), la profundidad del perfil del suelo (SOL_Z), el umbral de profundidad de agua en el acuífero libre (GWQMN) y la capacidad de agua disponible en el perfil del suelo (SOL_AWC), demostrando así la importancia de los parámetros que interfieren en los movimientos verticales de agua. Adicionalmente, al realizar el ajuste del modelo con la información de caudales registrados en la estación hidrométrica de Seminario, se obtuvieron resultados estadísticos de Nash Sutcliffe (NS), coeficiente de determinación (R^2) y el sesgo porcentual (PBIAS). Los cuales oscilaron entre $NS \geq 0,5$, $R^2 \geq 0.5$ y $PBIAS < \pm 16\%$. Al analizar el caudal diario para el periodo de calibración, se ha identificado que el modelo SWAT sobrestimó aproximadamente el 16% los caudales observados. En cambio, en el periodo de validación los caudales observados fueron subestimados cerca del 10%. En base a estos resultados, se concluye que el modelo SWAT ha representado el flujo diario para periodos secos y húmedos en la CSAA de manera satisfactoria. Por lo tanto, se considera también satisfactoria la simulación de las otras variables del balance hídrico acá analizadas.

La simulación del balance hídrico permitió analizar la dinámica espacio-temporal de la evapotranspiración real, escorrentía superficial, recarga, humedad del suelo, escorrentía subsuperficial, flujo base y del rendimiento hídrico para los 3 escenarios de usos del suelo propuestos. De estos procesos hidrológicos, la evapotranspiración y la recarga representaron cerca del 94% de la precipitación anual, demostrando que los movimientos verticales de agua son los que dominan en el balance hídrico de la cuenca. Igualmente, se comprobó que las variables que sufren mayores alteraciones por los cambios de usos del suelo, son principalmente la escorrentía superficial y la recarga.

Con la cuantificación de los procesos de la dinámica hídrica, se logró identificar el grado de influencia que los usos del suelo tienen en la respuesta del balance hídrico de la cuenca superior del arroyo Del Azul. Al contrastar la respuesta de las variables más importantes, se encontró que la evapotranspiración presentó cambios sutiles no mayores al 1% para cada escenario de uso del suelo, siendo el escenario P1 el que presentó los valores más bajos. Por otro lado, la escorrentía superficial mostró un descenso del 14% con el escenario P2, pero reportó incrementos del 5% con el escenario P3. En cuanto a la humedad del suelo, su respuesta tendió siempre a disminuir, 2% con el escenario P2 y 3% con el escenario P3. En el caso de la recarga, esta variable aumentó 5% con el escenario P2, pero se redujo 7% con la distribución de usos del suelo del escenario P3. Cabe señalar que con esta variable se logró hacer una clasificación general del porcentaje de recarga

que predominó en los diferentes sectores de la cuenca, identificando en las zonas de altas elevaciones una recarga superior al 15%, en la llanura de transición se vieron variaciones de 10% a 15%, en la región central de 2% a 5% y hacia el Norte de la cuenca, generalmente se recargó entre el 5% y 10%. En base a los resultados con cada escenario de usos del suelo y en consonancia con la hipótesis planteada, se demuestra que cuando una zona de llanura simplifica su cobertura vegetal, procesos como la escorrentía superficial aumenta, pero disminuye la tasa de recarga y humedad del suelo, lo cual aumentaría la magnitud de las inundaciones y sequías en estos territorios.

Al contrastar la susceptibilidad de los usos del suelo cuando ocurren eventos de extremos hídricos, se encontró que en el año 2008 (uno de los más secos del periodo analizado), la respuesta de la evapotranspiración con el escenario P1, fue 1% más baja que para los escenarios P2 y P3. Además, la humedad del suelo se incrementó cerca del 6% respecto al escenario P2 y, aproximadamente 7% respecto al escenario P3. En base a estos resultados, se concluye que los usos del suelo presentes en el escenario P1 ayudarían a reducir el déficit hídrico en épocas secas. Este escenario se caracterizó porque la práctica agrícola del doble cultivo abarcó más del 35% del territorio y, además, fue el escenario con mayor área cubierta por pasturas y pastizales naturales (23%), coberturas que ayudan a conservar la humedad del suelo. Al analizar el balance hídrico en el año 2012, se encontró que el volumen de la escorrentía superficial decreció 10% para el escenario P2, mientras que para el escenario P3 se incrementó 3%. Sabiendo que en este año ocurrieron 3 inundaciones, la respuesta de la recarga podría influir en la cantidad de agua que permanece en superficie. Los resultados de esta variable con el escenario P2 aumentaron 17% pero con el escenario P3 disminuyeron 6%. En este sentido, se considera que con los usos del suelo presentes en el escenario P2, la magnitud de las inundaciones disminuye y la resiliencia de la cuenca ante este fenómeno se incrementa gracias a la diversidad de coberturas que ayudan a conservar las propiedades físicas de los suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour K. C. 2007. User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, EAWAG, Dübendorf, Switzerland.
- Andriani, J. M. 2000. Consumo de agua de los cultivos en el Sur de Santa Fe. Para mejorar la Producción. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Oliveros, Argentina. 13, pp. 27-30.
- Aizen M. A., Garibaldi L. A. y Dondo M. 2009. Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), pp. 45-54.
http://hdl.handle.net/20.500.12110/ecologiaaustral_v019_n01_p045
- Andrade F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Research*, 41(1), pp. 1-12.
[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00107-N](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00107-N)
- Altesor, A., Ayala, W. y Paruelo, J. M. 2010. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Uruguay. FPTA, (26).
- Alvarez R. 2006. Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. INTA-Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. *Información Técnica de Trigo, Campaña*, 105.
- Aparicio J. 2007. El riesgo de sequía y su inclusión en los planes de protección civil. *Boletín de la A.G.E.* N° 44, pp. 95-116.
- Aranda, D. F. C. 2015. Modelo matemático determinístico para pronóstico de crecientes en cuencas rurales. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(1), pp. 43-62.
- Ares M. G., Chagas C. y Varni M. 2012. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia del suelo*, 30(2), pp. 151-160.
- Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S. y Williams J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., Kannan N. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*. 55(4), pp.1491-1508. Doi: 10.13031 / 2013.42256
- Arriaga H. O. 1987. La evolución del mejoramiento del maíz. In III Jornada Científica organizada por la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria y la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Badano N. 2010. Modelación hidrológica integrada de grandes cuencas de llanura con énfasis en la evaluación de inundaciones (Doctoral dissertation, Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería-UBA).
- Bailey, R., Rathjens H., Bieger K., Chaubey I., Arnold J. 2017. SWATMOD-Prep: Graphical User interface for Preparing Coupled SWAT-MODFLOW Simulations. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. 53(2), pp. 1-11. Doi: 10.1111/1752-1688.125 02.
- Baker T. y Miller S. 2013. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of hydrology*, 486, pp.100-111.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>

- Baldi G., Guerschman J. y Paruelo J. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(3-4), pp. 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.02.009>
- Ballari A., Botana M., Scarpati O. 2009. Distribución de las sequías e identificación de áreas de riesgo (Provincia de Buenos Aires). 13, pp. 130-146. ISSN 0329-0573.
- Barral M. y Maceira, O. 2012. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the Southeast Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, pp.34-43. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.010>
- Beven, K. 1986. Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. *Hillslope processes*, 16, pp. 187-202.
- Breuer L., Huisman J., Willems P., Bormann H., Bronstert A., Croke B., Kite G. 2009. Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). I: Model intercomparison with current land use. *Advances in water resources*. 32(2), pp. 129-146. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.10.003>.
- Bucich N. y Fernández A. 1993. Factibilidad de disminuir la concentración del ión nitrato en el sistema de aprovisionamiento de agua potable de Azul, provincia de Buenos Aires. Informe INCyTH, 52.
- Caamaño Nelli G., Fertoni M., Prendes H. y Quinodoz, H. 1979. Análisis de sistemas hidrológicos no típicos: bases teóricas y criterios metodológicos (No. 333.91). Universidad Nacional del Litoral.
- Cazenave G. y Vives L. 2014. Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. 33, pp. 83-91.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ed. Rialp, S.A. Madrid, España.
- Congalton R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: pp. 35-46.
- Du J., Rui H., Zuo T., Li Q., Zheng D., Chen A. y Xu C. 2013. Hydrological simulation by SWAT model with fixed and varied parameterization approaches under land use change. *Water resources management*, 27(8), pp. 2823-2838. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0317-0>
- Entraigas I. 2008. Implementación de sistemas de soporte de decisiones multipropósito a escala urbana y rural, tesis doctoral Universidad Nacional de la Plata, pp. 90-100. <http://hdl.handle.net/10915/4391>
- Estrela T. 1993. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas Transportes y Medio Ambiente, Madrid. pp. 7-15. <http://hdl.handle.net/10068/293822>
- Eyhéabide G., 2012. Bases para el manejo del cultivo de maíz (No. 633.15). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pergamino, Argentina.

- Fajardo González L. F. y Entraigas I. 2017. Conectividad hidrológica en un sistema hidrológico no típico: caso del sector llano de la cuenca del Arroyo del Azul (estado de avance). IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017.
<https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6781>
- FAO, 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos.
http://www.fao.org/aq/agse/agse_s/7mo/iita/iit.htmroma
- FAO, 2012. State of Food Insecurity in the World. Rome, Italy
- FAOSTAT, 2018. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database.
<http://www.apps.fao.org>
- Foley J., DeFries R., Asner G., Barford C., Bonan G., Carpenter S. y Helkowski, J. 2005. Global consequences of land use. *science*, 309(5734), pp. 570-574. DOI: 10.1126 /science.1111772
- Fohrer N., Haverkamp S., Eckhardt K., Frede G. 2001. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. 26(7), pp. 577-582. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(01\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(01)00052-1)
- Fuschini Mejía M. 1994. El agua en las llanuras (No. 551.4809145). UNESCO
- Gao X., Ouyang W., Hao Z., Shi Y., Wei P. y Hao F. 2017. Farmland–atmosphere feedbacks amplify decreases in diffuse nitrogen pollution in a freeze-thaw agricultural area under climate warming conditions. *Science of the Total Environment*, 579, pp. 484-494. doi.10.1016/j.scitotenv.2016.11.070
- Gaspari J., Rodríguez A. M., Senisterra G. E., Denegri G., Delgado M. I. y Besteiro S. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente. AUGMDOMUS*, 4, 143-158. Recuperado de: <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/download/476/505/>
- Ghaffari G., Keesstra S., Ghodousi J. y Ahmadi H. 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(7), pp. 892-903. <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>
- González Elizondo M., Jurado Ybarra E., González Elizondo S., Aguirre Calderón Ó., Jiménez Pérez, J. y Návar Cháidez J. 2003. Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia uanl*, 6(3).
- Guerschman J. P. 2005. Análisis regional del impacto de los cambios del uso de la tierra sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana (Argentina). Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires, 130.
- Guevara Ochoa C. y Cazenave G. 2015. Análisis de la variación de extremos hídricos debido a cambios en el uso de suelo y prácticas de manejo agrícola a través de un modelo hidrológico semidistribuido. Jornadas y Congreso Argentino de Ecología de Paisajes “El paisaje como unidad natural funcional, dinámica y resiliente” (Azul, Buenos Aires, 27 al 29 de mayo de 2015). <http://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/4135>
- Guevara Ochoa C., Briceño N., Zimmermann E. D., Vives L., Blanco M., Cazenave G. y Ares M. G. 2017. Relleno de series de precipitación diaria para largos periodos de tiempo en zonas de llanura: Caso de estudio cuenca superior del arroyo del Azul. <http://hdl.handle.net/11336/58891>
- Guevara Ochoa C., Lara B., Vives L., Zimmermann E., Gandini M. 2018. Una metodología para la

caracterización del uso del suelo mediante imágenes de media resolución espacial. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 24(2), pp. 207-218.

<http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.10.061>.

Guevara Ochoa C. 2019. Una metodología para el análisis de los patrones espacio temporales de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en áreas de llanura bajo escenarios de cambio climático. Tesis doctoral del centro científico tecnológico CONICET. URI: <http://hdl.handle.net/11336/83923>

Guevara Ochoa C., Masson I., Cazenave G., Vives L. y Vázquez Amábile G. 2019. A novel approach for the integral management of water extremes in plain areas. *Hydrology*, 6(3), 70. <https://doi.org/10.3390/hydrology6030070>

Guevara Ochoa C., Medina Sierra A., Vives L., Zimmermann E. y Bailey R. 2020. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. *Hydrological Processes*, 34(6), pp. 1371-1392. <https://doi.org/10.1002/hyp.13615>

Harbor J. 1994. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology. *Journal of the American Planning Association*. 60(1), pp. 95-108. <http://dx.doi.org/10.1080/01944369408975555>

Havrylenko S., Bodoque del Pozo J., Zucarelli G. y Mercuri P. 2013. Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una cuenca de la Región Pampeana. In Congreso Nacional del Agua. 24. CONAGUA 2013. 2013 10, pp. 14-18. San Juan. Argentina

Horton R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, transaction American Geophysical Union*. 14(1) pp. 446-460 <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>

Houghton Richard A. 2003. "Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000." *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 55.2, pp. 378-390. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i2.16764>

Hutchins M., Abesser C., Prudhomme C., Elliott J., Bloomfield J., Mansour M., Hitt O. 2018. Combined impacts of future land-use and climate stressors on water resources and quality in groundwater and surface waterbodies of the upper Thames river basin, UK. *Science of the Total Environment*. 631, pp. 962-986. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.052>

Hyandye C., Worqul A., Martz L. y Muzuka A, 2018. The impact of future climate and land use/cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies. *Environmental Systems Research*, 7(1), pp. 7. <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0110-4>

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3760-16-3 Azul sur, Hoja 3760 22-1. Base azupardo.

INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 2011. Siembra Directa. Actualización técnica n° 58

Knapp A., Beier C., Briske D., Classen A., Luo Y., Reichstein M. y Heisler J. 2008. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *Bioscience*, 58(9), pp. 811-821. <https://doi.org/10.1641/B580908>

Kovacs G. 1983. General principles of flat-land hydrology. *Hydrology on large flatlands*, pp. 298-355.

- Kroes J., van Dam J., Supit I., De Abelleira D., Verón S., de Wit A. y Wesseling J. 2019. Agrohydrological analysis of groundwater recharge and land use changes in the Pampas of Argentina. *Agricultural Water Management*, 213, pp. 843-857. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.008>
- Kruse, E. 1992. Estimación de escurrimientos subterráneos en la cuenca del arroyo Azul (Buenos Aires). *evaluación ambiental*, 2. Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires; a. Recursos y rasgos naturales en la evaluación ambiental. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/2307>
- Kraemer F., Chagas C., Vázquez Amábile G., Palacín E., Santanatoglia O., Castiglioni M. y Massobrio M. 2011. Aplicación del Modelo Hidrológico-Swat-en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Ciencia del suelo*, 29(1), pp. 75-82.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *science*, 304(5677), pp. 1623-1627. DOI: 10.1126 / science.1097396
- Lamparter G., Nobrega R., Kovacs K., Amorim R. y Gerold G. 2016. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. *Regional Environmental Change*, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s1011301610152>
- Langner A., Miettinen J. y Siegert F. 2007. Land cover change 2002–2005 in Borneo and the role of fire derived from MODIS imagery. *Global Change Biology*, 13(11), pp. 2329-2340. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01442.x>
- Lara B. y Gandini M. 2014. Quantifying the land cover changes and fragmentation patterns in the argentina pampas, in the last 37 years (1974-2011). *Geofocus*.14, pp. 163–180.
- Lara B. D. 2016. Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires, mediante imágenes LANDSAT. *Revista Cartográfica*, (92), 91. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i92.439>
- Larbi I., Obuobie E., Verhoef A., Julich S., Feger K. H., Bossa A. Y. y Macdonald D. 2020. Water balance components estimation under scenarios of land cover change in the Veia catchment, West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 65(13), pp. 2196-2209. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1802467>
- Laterra P. 2003. Desde el Paspaleto: bases ecológicas para el manejo de pajonales húmedos con quemas prescriptas. *Fuego en los ecosistemas argentinos* (ed. por C. Kunst, S. Bravo, J. Panigatti), pp. 93–107. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina
- Li Z., Liu W., Zhang X. y Zheng F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of hydrology*, 377(1-2), pp. 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.007>
- Lunetta R. S., Knight J. F., Ediriwickrema J., Lyon J. G. y Worthy L. D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote sensing of environment*, 105(2). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>
- Mas J. F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 20(1), pp. 139-152. <https://doi.org/10.1080/014311699213659>
- Maenza R., Agosta E. y Bettolli M. 2017. Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina. *International Journal of Climatology*, 37(S1), pp. 445-463.

<https://doi.org/10.1002/joc.5014>

- Melaku, N. D. y Wang, J. (2019). A modified SWAT module for estimating groundwater table at Lethbridge and Barons, Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 575, pp. 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.052>
- Milano F. A. 2009. Pago por servicios ambientales a productores: fuente de dinero para incentivar la siembra de pasturas. *Revista Argentina de Economía Agrarias. Nueva serie*, 11(2), pp. 127-148. ISSN 0327-3318
- Moriasi D., J. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel y T. Veith 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, pp. 885-900. doi:10.13031/2013.23153
- Olcina Cantos J. 2008. Prevención de riesgos: cambio climático, sequías. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad de Alicante
- Paruelo J. M., Guerschman J. P. y Verón S. R. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), pp. 14-23.
- Penman H.L. 1956. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. N°4, pp.729.
- Penman H. L. 1963. "Vegetation and hydrology." Technical Communication No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, U.K.
- Pielke R., Marland G., Betts R., Chase T., Eastman J., Niles J. y Running S. 2002. The influence of land-use changes and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), pp. 1705-1719. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1027>
- Regúés D. y Torri D. 2002. Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo sin vegetación. <http://hdl.handle.net/10261/4493>
- Sala J.M., Kruse E. y Aguglino, R. 1987. Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo del Azul, Provincia de Buenos Aires. CIC, Informe 37.
- Samaniego L. y Bárdossy A. 2007. Relating macroclimatic circulation patterns with characteristics of floods and droughts at the mesoscale. *Journal of Hydrology*, 335(1-2), pp. 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.004>
- Santana L. y Hernández J. 2008. Evapotranspiración Penman-Monteith. Obtenido de <http://www.agrocabildo.com>
- Santoni, C. S. y López, S. C. 2013. Impactos extremos en la hidrogeomorfología de cuencas semiáridas. Efectos de la deforestación y el cambio climático en el centro de Argentina.
- Satorre E. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia hoy*, 15(87), pp. 24-31.

- Scarpati O. y Capriolo A. 2013. Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, 2013(82), pp. 38-51. <https://doi.org/10.14350/riq.31903>
- Scian B. y Pierini J. 2013. Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective analysis. *Atmósfera*, 26(1), pp. 3-26. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71059-2](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71059-2)
- Scioli Carlos, 2010. Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Rosario. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/4108>
- Seto K. C., Woodcock C. E., Song C., Huang X., Lu J. y Kaufmann R. K. 2002. Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 23(10). <https://doi.org/10.1080/01431160110075532>
- Shaxson F. y Barber R. 2008. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Boletín de suelos de la FAO 79. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia, pp. 111
- Sing P. V. y Frevert D. 2006. *Watershed Models*. ISBN 0-8493-3609-0, pp. 3-21.
- Teruggi, M.E. y Kilmurray, J.O. 1975. Tandilia. 6 Congreso Geológico Argentino, Relatorio : pp. 57-77.
- Thornthwaite C. W. 1948. "An approach toward a rational classification of climate." *Geogr. Rev.*, 38, pp. 55–94
- Tóth J. 1999. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*. 7(1), pp. 1-14.
- Tricart J. 1973. Geomorfología de la Pampa Deprimida: base para los estudios edafológicos y agronómicos (No. 551.45 631.478212). Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería de la Nación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Troin M., Vallet-Coulomb C., Piovano E. y Sylvestre F. 2012. Rainfall–runoff modeling of recent hydroclimatic change in a subtropical lake catchment: Laguna Mar Chiquita, Argentina. *Journal of hydrology*, 475, pp. 379-391. United Nations, 1997. *Floods: people at risk: strategies for prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.010>
- Twisa S., Kazumba S., Kurian M. y Buchroithner M. F. 2020. Evaluating and Predicting the Effects of Land Use Changes on Hydrology in Wami River Basin, Tanzania. *Hydrology*, 7(1), pp. 17. <https://doi.org/10.3390/hydrology7010017>
- United Nations. 1997. Protocolo K. framework convention on climate change. Kyoto Protocol, Kyoto, 19, pp. 497.
- Usunoff E., Varni M., Weinzettel P. y Rivas R. 1999. Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín geológico y minero*, ISSN 0366-0176, Vol. 110, N° 4, 1999, pp. 47-62
- Varni, M. y Usunoff, E. 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal* 7, pp. 180–187. <https://doi.org/10.1007/s10040005019>

- Varni M. 2005. Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: valores medios y variaciones temporal y espacial (Doctoral dissertation, Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario).
- Varni M. y Weinzettel O. 2009. Análisis de registros freáticos en la cuenca del arroyo Azul. In VI Congreso Nacional de Hidrogeología y IV Seminario Hispanoamericano de Temas Actuales de la Hidrogeología Subterránea, Santa Rosa, La Pampa, Argentina, del (Vol. 24, pp. 299-307).
- Varni M., Zeme S., Weinzettez P. y Dietrich S. 2014. Relación entre recarga al acuífero freático y otros términos del balance hídrico en Azul, centro de la Provincia de Buenos Aires. In Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (Vol. 2). <http://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/5492>
- Vázquez P., Entraigas I., Varni M., Gandini M. y Usunoff E. 2003. Identificación de patrones de anegamiento en la cuenca del arroyo del Azul mediante el uso de imágenes Landsat. Revista de Teledetección de la Asociación Española de Teledetección, 19, pp. 43-50.
- Vazquez P. y Zulaica L. 2013. Intensificación agrícola y pérdida de servicios ambientales en el partido de Azul (Provincia de Buenos Aires) entre 2002-2011. Sociedad y Naturaleza, 25(3), pp. 543-556. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300008>
- Vázquez P., Zulaica L. y Requesens, E. 2016. Análisis ambiental de los cambios en el uso de las tierras en el partido de Azul (Buenos Aires, Argentina). Agriscientia, 33(1), pp. 15-26. URI: <http://hdl.handle.net/11336/91719>
- Voorst, F. B. 1967. Las comunidades vegetales de la depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Serie Fitogeográfica 7:1, pp. 262.
- Viglizzo, E. F., Roberto, Z. E., Lértora, F., Gay, E. L., Bernardos, J. 1997. Climate and landuse change in field-crop ecosystems of Argentina. Agriculture, Ecosystems & Environment. 66, pp 61-70. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00079-0).
- Viglizzo E. F., Lértora F., Pordomingo A. J., Bernardos J. N., Roberto Z. E. y Del Valle H. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. Agriculture, Ecosystems & Environment, 83(1-2), pp. 65-81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00155-9)
- Viglizzo E. F., Pordomingo A. J., Castro M. G. y Lértora F. A. 2003. Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the Pampas of Argentina. Environmental monitoring and assessment, 87(2), pp. 169-195. <https://doi.org/10.1023/A:1024654316879>
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. y Melillo, J. M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science. 277(5325), pp. 494-499. <https://doi:10.1126/science.277.5325.494>
- Wang Y. y Brubaker K. 2014. Implementing a nonlinear groundwater module in the soil and water assessment tool (SWAT). Hydrological Processes, 28(9), pp. 3388-3403. <https://doi.org/10.1002/hyp.9893>
- Wasilewski, M. y Chormanski, J. 2009. The Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model as an alternative data source for deriving hydrological characteristics in lowland catchment-Rogozynek catchment case study. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 41(1). ISSN : 2081-9617
- Weng Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote

sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of environmental management*, 64(3), pp. 273-284. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0509>

Wilhite D. A. y Glantz M. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*. 10, pp. 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

Ybran R. y Lacelli A. 2016. Informe estadístico mercado de soja. Cuba: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA.

Zárate, M. y Mehl, A. 2010. Geología y geomorfología de la cuenca del Arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura. 1, pp. 65-78.

Zeme S., Varni M., Entraigas I. y Vercelli N. 2014. Comportamiento del nivel freático a lo largo de una transecta en un área llana de pastizales naturales en la cuenca del arroyo del Azul. In II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (23 al 26 de septiembre de 2014, Santa Fe, Argentina). <https://digital.cic.qba.gob.ar/handle/11746/5402>

Zimmermann, E. D. 1999. Adaptación de tecnologías existentes a los sistemas hidrológicos de llanura: modificación y aplicación del modelo de onda cinemática. *Cuadernos del Curiam*. 2, pp. 11-31. ISSN 15142906.

ANEXOS

Tabla A.1. Cálculo de funciones de pedotransferencia para los horizontes de cada serie de suelo

No.	SERIE	SNAM	HOR	HYGDRP	TEXT	SOL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SOL_CBN	ARCILLA	LIMOS	ARENA	USLE_K
1	La loma	LLO	A	B	L	200	1,44	0,13	10,32	2,20	25	32,7	42,3	0,38
			BAt	C	CL	390	1,45	0,14	6,24	2,01	29,3	34,1	36,6	0,38
			Bt	C	CL	550	1,43	0,13	1,95	1,00	39,2	32,2	28,6	0,38
			2Ckkm	C	CL	750	1,50	0,12	3,20	0,93	33,4	25,7	40,9	0,38
2	La nueva esperanza	LNE	Ap1	C	CL	150	1,07	0,17	25,53	4,65	29,4	40,6	30	0,38
			Ap2	C	CL	230	1,23	0,15	12,15	3,22	32,2	38,8	29	0,38
			Btn	D	C	450	1,29	0,12	0,82	0,97	55,1	24,9	20	0,39
			Bck	B	L	630	1,44	0,16	6,47	0,18	26,4	48,6	25	0,36
3	Napaleofu	NP	A	C	SICL	120	1,01	0,17	26,42	5,59	33,6	52,4	14	0,38
			E/Ac	B	SIL	310	1,43	0,16	7,01	0,99	25,5	51,9	22,6	0,37
			Bt1	D	C	560	1,33	0,13	1,61	0,72	47,3	35,2	17,5	0,38
			Bt2	D	C	830	1,35	0,14	1,33	0,34	46,4	34,7	18,9	0,38
4	Cinco cerros	CC	BC	C	CL	1100	1,46	0,15	2,26	0,18	34,5	43,8	21,7	0,37
			Ap	C	CL	230	1,25	0,14	12,25	3,50	30,7	30,9	38,4	0,38
5	Olavarría	OLA	Bt	D	C	450	1,29	0,13	4,05	1,53	41,8	24,9	33,3	0,39
			Ap	C	CL	140	1,12	0,16	16,82	4,22	33,8	42,4	23,8	0,38
			A	C	CL	250	1,12	0,16	17,31	3,46	34,3	42,9	22,8	0,38
			BA	C	CL	320	1,34	0,15	4,52	1,63	36,6	40,5	22,9	0,38
			Bt1	D	C	470	1,39	0,14	2,10	0,96	40,7	33,2	26,1	0,38
6	Tandil	TA	Bt2	D	SICL	660	1,37	0,15	2,02	0,48	41,2	43,5	15,3	0,37
			Ap	C	CL	200	1,14	0,16	20,18	3,92	29,4	41,8	28,8	0,38
			BA	C	CL	370	1,33	0,15	4,42	1,74	38,3	39,7	22	0,38
			Bt	D	C	800	1,38	0,14	1,84	0,74	42,1	35,3	22,6	0,37
			BC	C	CL	1000	1,52	0,14	3,34	0,18	30,2	37,1	32,7	0,37
7	Tres esquinas	TES	C	B	L	1350	1,58	0,13	5,91	0,10	24,4	35,3	40,3	0,37
			Ap	C	SICL	300	1,05	0,17	24,85	4,30	30,7	49,9	19,4	0,38
			BA	C	SICL	450	1,37	0,15	2,72	0,75	38,5	45,6	15,9	0,37
			Btss	D	CL	700	1,37	0,14	1,83	0,53	41,6	39	19,4	0,37
			Bt	D	C	1005	1,46	0,14	1,97	0,28	36,8	35,2	28	0,37
			BC	B	L	1400	1,59	0,13	7,79	0,10	20,8	38,7	40,5	0,36
8	Arroyo Azul	COA	C	B	L	1800	1,61	0,12	10,50	0,05	19	35,4	45,6	0,36
			Ap/A	C	CL	200	1,14	0,16	19,70	4,46	30,3	34,7	35	0,38
			BAt	C	CL	230	1,38	0,13	5,36	1,99	34,4	28,6	37	0,39
			Bt	D	C	500	1,36	0,13	1,01	0,71	48,1	26,5	25,4	0,38
9	La alianza	LA	BC	B	L	850	1,57	0,12	6,37	0,20	25,2	29,5	45,3	0,37
10	La delicia	LD	Ap	C	CL	200	1,09	0,16	20,25	4,59	32,7	41,6	25,7	0,38
			Bt	D	C	400	1,34	0,13	1,27	1,11	47,7	32,7	19,6	0,38
11	Mar del plata	MP	Ap	B	L	90	1,15	0,16	29,72	4,03	23,1	35,8	41,1	0,38
			A	B	L	280	1,27	0,15	23,18	3,06	22,4	33,6	44	0,38
			AB	B	L	310	1,41	0,14	12,22	1,74	23,6	36,3	40,1	0,38
			Bt1	C	CL	500	1,43	0,13	4,59	1,36	33,3	29,2	37,5	0,38
			Bt2	C	CL	700	1,49	0,14	3,78	0,58	31,4	34,4	34,2	0,37
			BC	B	L	910	1,58	0,12	11,39	0,29	19,6	31,3	49,1	0,36
12	Sierra chica	SCH	C	A	SAL	1500	1,62	0,11	19,39	0,04	13,7	33,4	52,9	0,36
			Ap	B	L	110	1,05	0,17	44,46	4,55	19,7	41,4	38,9	0,38
			A	B	L	260	1,20	0,16	22,17	3,48	22,4	36,3	41,3	0,38
			E	B	L	330	1,51	0,12	25,16	1	14,2	34,3	51,5	0,36
13	Sierra. Padres	SP	Btn	C	CL	510	1,49	0,13	3,18	0,57	32,7	29,8	37,5	0,37
14	Balcarce	BAL	Ap	C	CL	150	1,14	0,15	16,42	8,86	32,8	33,8	33,4	0,38
			Ap	B	L	150	1,19	0,15	21,96	4,11	25,7	31,5	42,8	0,38
			BA	A	SACL	300	1,35	0,13	11,40	2,64	27,8	27,3	44,9	0,38
			Bt1	C	CL	500	1,46	0,13	5,15	1,2	31,3	28,3	40,4	0,38
			Bt2	C	CL	700	1,49	0,13	4,85	0,64	29,3	35	35,7	0,37

Tabla A.1. Cálculo de funciones de pedotransferencia para los horizontes de cada serie de suelo

15	Arroyo Videla	COAOVI	Ap/A	C	CL	200	1,41	0,14	6,51	4,45	30,3	34,7	35	0,38
			BAt	C	CL	290	1,38	0,13	5,36	1,98	34,4	28,6	37	0,39
			Bt	D	C	500	1,37	0,13	0,82	0,31	48,1	26,5	25,4	0,38
			BC	B	L	850	1,57	0,12	6,37	0,2	25,2	29,5	45,3	0,37
16	Blanca chica	BCH	Ap	A	SAL	120	1,31	0,12	27,15	3,05	19,9	24,4	55,7	0,38
			A	A	SAL	280	1,44	0,11	24,71	1,85	18,2	23,5	58,3	0,38
			AB	A	SAL	410	1,55	0,09	20,54	0,86	17,5	20,6	61,9	0,37
			2Bt	A	SAL	650	1,57	0,10	7,88	0,56	25,5	17,8	56,7	0,38
			2BCm	A	SAL	900	1,62	0,08	24,54	0,14	16,9	17,8	65,3	0,37
			2C	A	SAL	1100	1,62	0,08	26,89	0,16	14,7	16,6	68,7	0,37
17	Estancia aldecoa	EAA	A	D	SICL	210	1,19	0,18	16,76	2,9	28,4	52,2	19,4	0,38
			BAt	D	SICL	360	1,35	0,16	3,36	0,91	36,9	49,9	13,2	0,37
			Bt1	D	SIC	520	1,33	0,15	2,65	0,75	41,2	46,8	12	0,37
			Bt2	D	SIC	710	1,37	0,15	2,21	0,52	39,9	45,5	14,6	0,37
			Bt3	D	SICL	940	1,41	0,15	2,00	0,3	37,9	45,5	16,6	0,37
			Btc	D	SICL	1200	1,42	0,16	2,20	0,23	35,4	52	12,6	0,37
			BCt	D	SICL	1450	1,46	0,16	2,47	0,18	31,3	53,5	15,2	0,36
			C	D	CL	1720	1,52	0,15	3,53	0,17	27,9	45,5	26,6	0,36
18	General Guido	GG	A	B	L	140	1,31	0,15	13,67	2,44	25,7	40	34,3	0,38
			Btcn	D	C	340	1,25	0,12	0,98	0,68	57,5	27,2	15,3	0,38
			Btcnk	D	CL	520	1,43	0,14	1,81	0,46	38,9	33,8	27,3	0,37
			BCnk1	B	L	900	1,56	0,14	5,00	0,14	25,5	39,6	34,9	0,37
			BCnk2	B	L	1300	1,60	0,14	7,73	0,02	19,6	42,2	38,2	0,36
			Cnk	B	L	1600	1,59	0,30	7,35	0,02	20,6	39,9	39,5	0,36
19	La escocia	LE	A	B	SIL	100	1,09	0,19	28,40	3,58	24,3	56,9	18,8	0,37
			Bt	D	SIC	380	1,34	0,14	2,45	0,84	42,3	42,5	15,2	0,37
			Btkn	D	C	580	1,04	0,13	1,27	0,34	54	31,5	14,5	0,38
20	Querandies	QUE	Apn	D	CL	150	1,21	0,16	1,33	3,18	32,3	43,5	24,2	0,38
			BAtn	D	C	250	1,32	0,13	1,72	0,82	47,3	35,7	17	0,38
			Btssn	D	C	500	1,30	0,14	2,00	0,6	66,2	23,9	9,9	0,39

Los datos de las series del suelo se obtuvieron del estudio del (INTA, 1992) que se encuentra a escala 1:50,000

- SERIE: Nombre de la serie de suelo
- SNAM: Simbología
- HOR: Tipo de horizonte
- TEXT: Textura de cada horizonte del suelo clasificación en inglés
- SOL_Z: Profundidad del cada horizonte de suelo (mm)
- ARCILLA: Cantidad de arcilla del horizonte en %
- ARENA: Cantidad de arena del horizonte en %
- LIMO: Cantidad de limo del horizonte en %

Con el programa SPAW Soil-Plant-Air-Water (Saxton y Willey, 2006) se obtienen los valores hidráulicos para cada horizonte de cada tipo de suelo. Además, por medio de este programa se puede estimar:

- SOL_BD: Densidad aparente del suelo (g/cm^3)
- SOL_AWC: Capacidad o máximo contenido de agua para un determinado suelo (mm/mm)
- SOL_K: Conductividad hidráulica del suelo (mm/hr)

- SOL_CBN: es la cantidad de carbón por horizonte de suelo y se obtiene dividiendo la materia orgánica del horizonte por 1.72. Este factor es conocido como “Van Bemmelen factor” el cual se basa en la suposición de que el contenido de materia orgánica en un suelo es 58% de carbono (Allison, 1965).
- USLE_K: Factor de erodabilidad de cada horizonte de cada serie de suelo (Williams, 1995).
- HYGDRP: Grupo hidrológico de cada horizonte de suelo

El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS, siglas en inglés) clasifica a los suelos en cuatro grupos hidrológicos, basados en las características de infiltración. El NRCS define a un grupo hidrológico, como un grupo de suelos que poseen potencial de escorrentía bajo condiciones similares de cubierta y de tormenta. Las propiedades que influyen el potencial de escorrentía son aquellas que impactan el índice mínimo de infiltración después de una humedad prolongada y cuando no está congelada. Estas propiedades son nivel freático alto estacional, conductividad hidráulica saturada, y profundidad de la capa permeable. El suelo puede ser clasificado en uno de cuatro grupos: A, B, C y D, o en tres clases dobles: A/D, B/D, y C/D. Las definiciones de las clases son:

- A: Suelos que tienen altas tasas de infiltración cuando están completamente húmedos. Principalmente consisten de arenas, las cuales tienen un índice alto de transmisión de agua. (Potencial de escorrentía bajo).
- B: Suelos que tienen tasas de infiltración moderada cuando están completamente húmedos. Son suelos moderadamente profundos a profundos, suelos moderadamente drenados los cuales tienen texturas finas a texturas gruesas. (Potencial de escorrentía medio-bajo).
- C: Suelos que tiene tasas infiltración lenta cuando están completamente húmedos, principalmente tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua o son de textura moderadamente fina. (Potencial de escorrentía medio-alto).
- D: Suelos que tienen tasas de infiltración muy lentas cuando están completamente húmedos. Se trata fundamentalmente de arcillas con alta capacidad para expandirse y contraerse, suelos poco profundos sobre un material casi impermeable. (Potencial de escorrentía alto).

Se utiliza una serie de 13 años de datos diarios desde el 01/1/2003 al 31/12/2015, para crear la base datos de clima, la cual es una entrada en el modelo SWAT. A partir de estos datos tabulados se calculan los estadísticos climáticos para cada estación (Tablas A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7 y A.8).

Tabla A.2. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Azul (SMN)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	29.8	27.4	24.7	20.1	15.6	14.1	14.4	16.6	19.3	23.1	26.9	29.8
TMPMN	14.5	12.7	9.8	7.4	4.1	2.4	2.9	4.4	6.1	8.7	11.1	13.6
TMPSTDMX	4.7	4.5	5	4.6	3.5	3.3	4	4.2	4.1	5	4.6	3.9
TMPSTDMN	4.1	4.4	5.6	4.9	4.7	5	4.8	4.4	4.4	4.4	4.2	4.2
PCPMM	88.6	85.6	89.2	79.1	50.2	37.9	51.1	61.8	58.9	81.9	79.2	83.3
PCPSTD	9.1	8.9	10.1	8.9	6.2	5.2	5.2	7	7.3	8	8.8	8.3
PCPSKW	4.3	4.2	5.5	5	6.6	6.2	4.5	5	6.9	4.8	5.6	4.5
PR_W1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
PR_W2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3
PCPD	7.4	8.6	8.5	8.2	7.5	7.3	8.5	7.5	6.5	9.1	8.2	8
RAINHHMX	11.4	12.5	14.5	12.1	7.9	7.1	6.4	6.8	9.8	11.7	12.7	10.1
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5
WNDVAV	2.9	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4	2.6	3	3.1	2.6	2.8	3

Tabla A.3. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Chillar (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31	28.7	25.7	21.1	16.2	13.6	13.6	15.1	18.6	21.8	26	30.2
TMPMN	14.4	13.9	11.3	8.3	5.4	3.2	2.8	3.8	5.7	8.3	10.5	12.9
TMPSTDMX	4.7	4.5	4.8	4.8	3.5	3.5	4.2	4.2	4.4	4.9	4.5	4.5
TMPSTDMN	4	3.8	5	4.7	4.4	4.4	4.7	4.4	4.1	4	4	4.1
PCPMM	93.4	74.5	83.5	82.7	53.7	31.6	46.5	59.5	50.9	80.7	78.8	79.5
PCPSTD	9.7	7.1	9.8	9.8	9	6	5.1	7.4	6.1	7.4	7.3	8.2
PCPSKW	5.2	4	7.1	5.9	12.5	13.2	5	5.5	5.2	5.7	4.9	6.2
PR_W1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
PCPD	10	11.2	12.7	12.3	13.1	12.2	12	11	9.2	13.2	11.4	10.5
RAINHHMX	12.8	9.2	13.3	13	10	6.9	6.8	7.2	9.2	10.6	9.8	10.1
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6
WNDVAV	4.7	4.3	4.4	4.5	4.5	4.6	4.9	4.9	5.1	5	5	4.8

Tabla A.4. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Cerro del águila (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31.2	28.9	25.8	21.2	16.3	13.7	13.7	15.2	18.7	22	26.3	30.4
TMPMN	14.7	14.1	11.7	8.8	5.9	4	3.5	4.3	6.3	8.7	10.8	13.2
TMPSTDMX	4.5	4.5	4.6	4.7	3.5	3.5	4.2	4.2	4.3	4.8	4.4	4.4
TMPSTDMN	4	3.8	4.9	4.6	4.3	4.1	4.4	4.2	3.9	3.9	4.1	4.1
PCPMM	102.2	75.9	83.2	78.9	51.2	28.3	46.7	53.1	52.8	76.7	78.8	77.6
PCPSTD	11.4	7.3	8.9	8.5	8.2	4	5.2	6.5	6.1	6.8	7.4	7.1
PCPSKW	6.3	4.4	5	4.8	11.4	8.1	5.3	6.1	5.2	4.4	5	5.1
PR_W1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
PCPD	10.1	10.7	11.7	11	12.2	11.3	12.3	11.1	8.6	12.5	11.6	10.5
RAINHHMX	14.3	9.2	13	12	9.6	5.6	6.5	6.3	8.9	9.6	9.8	8.7
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6
WNDVAV	3.8	3.5	3.4	3.5	3.5	3.6	3.8	4.1	4.1	4.1	4	3.9

Tabla A.5. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Germania (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31	28.7	25.7	21.1	16.2	13.6	13.6	15.1	18.6	21.8	26	30.2
TMPMN	14.4	13.9	11.3	8.3	5.4	3.2	2.8	3.8	5.7	8.3	10.5	12.9
TMPSTDMX	4.7	4.5	4.8	4.8	3.5	3.5	4.2	4.2	4.4	4.9	4.5	4.5
TMPSTDMN	4	3.8	5	4.7	4.4	4.4	4.7	4.4	4.1	4	4	4.1
PCPMM	91.7	79.9	79.8	76.6	52.6	28.7	45	53.2	50.6	73.6	71.8	75.2
PCPSTD	9.3	7.9	9.2	9	8.7	4.3	4.8	6.5	6	7.1	6.8	7.1
PCPSKW	5.3	4	6.5	4.9	12.5	8.6	4.9	5.6	5	5.7	4.6	5
PR_W1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5
PCPD	10.4	11.2	12.8	10.5	13.3	13.2	13	11.8	10	12.6	10.5	10.3
RAINHHMX	12	10.1	12.7	12.2	9.9	6	6.4	6.5	8.8	10	8.6	8.9
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6
WNDVAV	4.7	4.3	4.4	4.5	4.5	4.6	4.9	4.9	5.1	5	5	4.8

Tabla A.6. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Chiquita (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31.7	29.4	26.4	21.9	16.9	14.3	14.3	15.8	19.4	22.7	26.9	31
TMPMN	13.3	12.8	9.8	6.7	3.9	1.8	1.5	2.6	4.7	7.2	9.2	11.7
TMPSTDMX	4.7	5	4.7	5.3	3.6	3.5	4.1	4.1	4.2	4.7	4.5	4.4
TMPSTDMN	4.6	4.4	5.6	5.3	5.1	5.2	5.6	5.2	4.7	4.7	4.6	4.7
PCPMM	85.2	83.1	80.3	75.2	52.5	28.9	37.2	52.5	48.3	73.4	78.3	72.4
PCPSTD	8.5	7.9	9.8	8.8	9.1	4.2	4.3	6.3	6.1	6.7	7.4	6.5
PCPSKW	4.4	3.8	7.5	5.3	12.5	9	5.4	5.7	6.1	5.1	5	4.4
PR_W1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5
PCPD	9.9	11	13.8	12.5	14.1	13.2	11.5	11.7	9.2	12.3	11.5	11.1
RAINHHMX	10.6	9.8	13.6	12.2	10	5.7	5.2	6	8.7	9.4	9.5	8.6
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6
WNDVAV	3.8	3.5	3.4	3.4	3.4	3.5	3.8	4.1	4.2	4.1	4.1	4

Tabla A.7. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Siempre amigos (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31.1	28.8	25.9	21.4	16.7	14.1	14.1	15.7	19.2	22.4	26.2	30
TMPMN	13.8	13.1	10.2	7	4.4	2.1	1.8	2.9	5.1	7.6	9.6	12.1
TMPSTDMX	4.4	4.4	4.6	4.6	3.5	3.5	4.1	4.1	4.2	5	4.3	4.2
TMPSTDMN	4.3	4.2	5.5	5.1	5	5.2	5.5	5	4.5	4.4	4.5	4.5
PCPMM	90	85.4	78.1	73.2	49.2	27.3	38.7	53.5	50	68.3	79.4	70.2
PCPSTD	8.9	8.5	8.9	8.6	7.5	3.8	4.3	6.3	5.9	5.9	7.8	6.1
PCPSKW	4.4	4	6.2	5.9	9.6	7.4	5.4	5.7	5.4	3.9	5.3	4.1
PR_W1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5
PCPD	10.2	10.7	13.1	12.3	12.9	12.3	12.5	11.5	9.5	12.8	11.1	10.5
RAINHHMX	10.9	10.9	12.8	11.3	9.1	5.4	5.2	5.8	8.6	8.3	10.4	7.8
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6
WNDVAV	3.6	3.3	3.2	3.2	3.3	3.4	3.6	3.9	4	3.9	3.9	3.8

Tabla A.8. Estadísticos climáticos mensuales calculados para la estación Firmeza (IHLLA)

Estadístico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
TMPMX	31.1	28.9	25.9	21.4	16.6	14.1	13.9	15.5	19.1	22.4	26.6	29.8
TMPMN	13.6	12.9	10	6.8	4	2	1.4	2.8	5	7.9	9.8	12.4
TMPSTDMX	4.4	4.4	4.5	4.7	3.4	3.4	5	4.1	4.2	4.7	4.5	3.8
TMPSTDMN	4.5	4.4	5.6	5.2	5.1	5.2	6.6	5.1	4.7	4.6	4.6	4.6
PCPMM	84.3	87	75.6	77.7	56.9	27.7	39.5	51.7	49.9	68.6	79.5	72.3
PCPSTD	8.1	9.4	9.3	9.5	8.4	3.6	4.4	6.1	6.1	6.1	7.7	6.6
PCPSKW	4.3	5	6.9	5.7	9.8	6.8	5.4	5.8	5.8	4.1	5.3	4.2
PR_W1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
PR_W2	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5
PCPD	11.1	10.8	13.6	13	14	13.4	13.3	11.5	10.2	13.2	10.9	10.6
RAINHHMX	10	12.3	13.5	12.8	9.7	5.3	5.3	5.7	8.8	8.7	9.9	7.9
SOLARAV	23	20	16.7	12.2	8.5	6.8	7.5	9.8	13.1	17.4	21.2	22.4
DEWPT	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6
WNDVAV	3.8	3.5	3.4	3.4	3.4	3.5	3.8	4.1	4.2	4.1	4.1	4

Donde:

- TMPMX: Temperatura máxima promedio del aire en el mes (°C)
- TMPMN: Temperatura mínima promedio del aire en el mes (°C)
- TMPSTDMX: Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes (°C)
- TMPSTDMN: Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes (°C)
- PCPMM: Cantidad de precipitación promedio en el mes (mm)
- PCPSTD: Desviación estándar de la precipitación en el mes (mm)
- PCPSKW: Coeficiente de asimetría de la precipitación en el mes
- PR_W1: Probabilidad de un día húmedo seguido de un día seco en el mes
- PR_W2: Probabilidad de un día húmedo seguido de un día húmedo en el mes
- PCPD: Número de días de precipitación en el mes (día)
- RAINHHMX: Intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos en el mes (mm)
- SOLARAV: Radiación solar promedio en el mes (MJ/m² /día)
- DEWPT: Temperatura promedio del punto de rocío en el mes (°C)
- WNDVAV: Velocidad del viento promedio en el mes (m/s)

ECUACIONES DE FLUJO DE ESCORRENTIA SUPERFICIAL

SWAT provee dos métodos para poder estimar la escorrentía superficial: el procedimiento de distribución del número de curva SCS (SCS, 1972) y el método de 98 infiltración de Green and Ampt. En este trabajo se usó el método del número de curva SCS.

El método de escorrentía SCS, es un modelo empírico desarrollado para proveer una base consistente para estimar las cantidades de escorrentía bajo diferentes condiciones de cobertura y tipos de suelo. Su ecuación es la siguiente:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

Donde

- Q_{surf} es la escorrentía acumulada o el exceso de lluvia (mm)
- R_{days} es la lámina de lluvia el día (mm)
- I es la abstracción inicial que incluye almacenaje de la superficie, interceptión e infiltración antes de la escorrentía (mm)
- S es el parámetro de retención (mm). Se define el parámetro de retención como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde CN es el número de curva para el día.

CONDICIÓN ANTECEDENTE DE HUMEDAD DEL SUELO

El SCS define tres condiciones de humedad antecedente:

- seco (punto de marchitez) (humedad I)
- humedad promedio (humedad II)
- húmedo (capacidad de campo) (humedad III).

La condición de humedad I de número de curva es el valor más bajo de curva diaria que se asume en condiciones secas, mientras que la condición III es el valor más alto y corresponde a condiciones húmedas. El método lo supone condición I o III según la lluvia antecedente de los 5 días previos. Las curvas para condiciones húmedas I y III se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 * (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + e^{[2.533 - 0.064 * (100 - CN_2)])}}$$

$$CN_3 = CN_2 * e^{[0.00673 * (100 - CN_2)]}$$

CAUDAL PICO

El caudal pico es el máximo flujo de escorrentía que ocurre en un evento de lluvia. SWAT calcula el caudal pico por medio del método racional modificado. Este método se basa en asumir que la intensidad de lluvia i inicia al tiempo $t=0$ y continua indefinidamente, el caudal pico se incrementara hasta el tiempo de concentración ($t = t_{conc}$) cuando el área completa de la cuenca está contribuyendo a la salida. La fórmula del método racional modificado es:

$$q_{peak} = \frac{C * i * Area}{3.6}$$

Donde q_{peak} es el caudal pico de escorrentía (m^3/s), C es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de lluvia (mm/hr), $Area$ es el área de la cuenca (km) y 3.6 es un factor de unidad de conversión.

CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

El cálculo de la evapotranspiración ha sido de gran debate debido a que la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente, lo cual hace difícil distinguir entre estos dos procesos. A parte de la disponibilidad de agua en los estratos superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que este proyecta cada vez más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. La evaporación del suelo se calcula a través de funciones exponenciales en relación con la profundidad del suelo y su contenido de agua. La transpiración de las plantas se estima mediante una función lineal, relacionando la evapotranspiración potencial (ETP) con el índice de área foliar.

De acuerdo a Thornthwaite (1948), la ETP corresponde a la cantidad de agua máxima que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación en el supuesto de no haber limitaciones en la disponibilidad de agua. Posteriormente, Penmann (1963) define la ETP como la

cantidad de agua transpirada por una cosecha verde corta, tapando completamente el suelo, con altura uniforme y siempre con agua, utilizando la alfalfa como cultivo de referencia. Según Santana y Hernández (2008), el método FAO Penman-Monteith es el único que determina la ET con parámetros climáticos como la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Este método fue desarrollado haciendo uso del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con altura de 0.12 m, una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0.25. Con estas condiciones, la evapotranspiración se determina con la siguiente ecuación:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm)

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻²día⁻¹)

R_a = radiación extraterrestre (mm/día)

G = flujo de calor del suelo (MJ m⁻²día⁻¹)

T = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

U_2 = Velocidad del viento a 2 metros de altura (m/s)

e_s = presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/ °C)

γ = constante psicrométrica (kPa/ °C)

RECARGA

El agua que se mueve desde la zona más profunda del perfil del suelo por percolación o flujo de desviación entra y fluye a través de la zona vadosa antes de convertirse en un flujo en un acuífero libre y/o de recarga. El lapso entre el tiempo que el agua sale del perfil del suelo y pasa al acuífero poco profundo dependerá de la profundidad de nivel freático y de las propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas en la zona vadosa y las zonas de aguas subterráneas. La recarga en un día dado es calculada con la siguiente ecuación:

$$W_{rch.i} = \left(1 - \exp \left[-\frac{1}{\delta_{gw}} \right] \right) * w_{deep} + \exp \left[-\frac{1}{\delta_{gw}} \right] * w_{rch.i-1}$$

Donde $W_{rch,i}$ es la cantidad de recarga que entra a los acuíferos al día día i (mm), gw es el tiempo de demora o tiempo de desagüe de los formaciones geológicas sobreyacentes (días), w_{deep} es la cantidad total de agua saliendo del fondo del perfil del suelo al día día i (mm), y $w_{rch,i-1}$ es la cantidad de recarga entrando a los acuíferos por día $i-1$ (mm). La cantidad total de agua saliendo del fondo del perfil del suelo al día día i se calcula:

$$W_{deep} = W_{perc.ly=n} + W_{crk,btm}$$

Donde W_{deep} es la cantidad de agua saliendo del fondo del perfil del suelo al día día i (mm), $W_{perc.ly=nes}$ la cantidad de agua en percolación fuera del nivel más profundo en el perfil del suelo al día día i (mm), y $W_{crk,btm}$ es el volumen del caudal después de los límites más bajos del perfil del suelo debido a un flujo de desviación al día i (mm).