

**CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS EN CUENCAS AGRÍCOLAS DE LA  
REGIÓN PAMPEANA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO  
HIDROLÓGICO SWAT**

Por Sofía Beatriz Havrylenko

Director: Dr. José María Bodoque del Pozo

Co-Director: Mag. Graciela Viviana Zucarelli

Tesis remitida al Comité Académico de Maestría de la  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS  
Como parte de los requisitos para la obtención del grado de  
MAGISTER EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Agosto, 2013

## Certificación del Jurado de Tesis y del Director de Tesis



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas**

Santa Fe, 21 de noviembre de 2013.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada "*Caracterización de sequías en una cuenca agrícola de la Región Pampeana mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT*", desarrollada por la Ing. Sofía Beatriz HAVRYLENKO, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

  
-----  
Dr. José Macor

  
-----  
Dra. Marta Marizza

  
-----  
Dr. Erik Zimmermann

Santa Fe, 21 de noviembre de 2013.

Certifico haber leído esta Tesis preparada bajo mi dirección y recomiendo que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

  
-----  
Mg. Viviana Zucarelli  
Codirectora de Tesis

-----  
Dr. José María Bodoque del Pozo  
Director de Tesis

Universidad Nacional del Litoral  
Facultad de Ingeniería y  
Ciencias Hídricas  
  
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria  
C.C. 217  
Ruta Nacional N° 166 - Km. 472,4  
(3000) Santa Fe  
Tel: (54) (0342) 4575 229  
Fax: (54) (0342) 4575 224  
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

## Declaración de la Autora

---

Esta Tesis ha sido remitida como parte de los requisitos para la obtención del grado académico de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos ante la Universidad Nacional del Litoral y ha sido depositada en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas para que esté a disposición de sus lectores bajo las condiciones estipuladas por el Reglamento de la mencionada Biblioteca. Citaciones breves de esta Tesis son permitidas sin la necesidad de un permiso especial, en la suposición de que la fuente sea correctamente citada. Solicitudes de permiso para una citación extendida o para la reproducción parcial o total de este manuscrito serán exigidas por el portador legal del derecho de propiedad intelectual de la obra.

Firma:



## Dedicatoria

---

Me gustaría expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. José María Bodoque del Pozo, director de esta tesis, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma.

De igual manera, agradecer a mi co-directora de tesis Mag. Viviana G. Zucarelli y mi director de beca el Dr. Pablo A. Mercuri, por el apoyo y la confianza que siempre me brindaron, las gestiones realizadas y su contribución en el proceso de mi formación como persona e investigadora.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a todos mis compañeros del Instituto de Clima y Agua, por su colaboración y aportes técnicos, en especial al Msc. Francisco Damiano, el Ing. Eduardo Flamenco, Msc. Roberto de Ruyber, la Lic. Natalia Gattinoni y Nestor Barrionuevo. Y al Msc. Marcelo Uriburu, por sus aportes y sugerencias que han contribuido a mejorar esta tesis.

Gracias también a mis queridos compañeros de maestría, que ayudaron a que pueda lograr esta meta. Y a mi familia y amigos por la comprensión, la paciencia y el ánimo recibidos.

Por último, quisiera agradecer al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por haberme dado la oportunidad, la confianza y el apoyo económico para realizar esta Maestría.

A todos ellos, muchas gracias.

Sofía

## Dedicatoria

---

*Dedico esta tesis a mis dos grandes compañeros de la vida, Aldo y Juan Pablo, por su gran sacrificio y esfuerzo, y por haberme acompañado incondicionalmente en este proyecto desde el principio.*

## Índice General

Estructura de la Tesis.....	1
Capítulo 1 Introducción .....	2
1.1. Planteo de la problemática .....	2
1.2. Objetivos .....	3
Capítulo 2 : Estado del arte.....	5
2.1. La sequía agrícola.....	5
2.2. Circunstancias regionales y locales.....	11
Capítulo 3 : Área de estudio .....	13
3.1. Características generales y ubicación.....	13
3.2. Aspectos sociales y económicos.....	14
3.3. Características morfométricas de la cuenca .....	16
3.4 Uso de suelo .....	23
3.5 Suelos .....	24
3.6 Hidroclimatología.....	25
Capítulo 4 : Metodología .....	29
4.1. Sinopsis de los fundamentos teóricos del modelo SWAT .....	29
4.2. Datos de entrada al modelo SWAT para generar el modelo de cuenca .....	31
4.3. Resto de datos de entrada al modelo .....	44
4.4. Implementación del modelo SWAT para la estimación de humedad de suelo .....	49
4.5. Índice de precipitación estandarizado SPI.....	64
4.6. Índice verde .....	66
4.7. Correlación entre los índices SPI y NDVI con la humedad del suelo (HSS).....	69
Capítulo 5 : Resultados.....	70
5.1. Datos de entrada al modelo SWAT.....	70
5.2. Estimación de la humedad de suelo .....	79
5.3. Índice de precipitación estandarizado .....	87
5.4. Índice verde .....	89
5.5. Correlación del SPI y NDVI con la HSS .....	96
Capítulo 6 : Discusión.....	101
6.1. Discusión de los resultados .....	101
6.2. Discusión de la metodología y recomendaciones.....	111
Capítulo 7 : Conclusiones.....	114

Capítulo 8 : Futuras líneas de investigación .....	117
Anexo 1: Datos de entrada para generar el modelo de cuenca .....	119
Anexo 2: Resto de datos de entrada.....	129
Anexo 3: Datos para calibrar y validar .....	136
Anexo 4: Datos de contenido de agua en el suelo (Soil Water-SW) .....	136
Glosario y listado de símbolos elementales.....	137
Referencias.....	139

## Índice de Figuras

Figura 3. 1. Ubicación geográfica del área de estudio situada dentro de la cuenca del río Arrecifes.....	13
Figura 3. 2. Elevación altitudinal de la cuenca en el área de estudio. Elaboración propia a partir del MDE mediante el criterio de división por altitud, considerando tres intervalos de altura iguales (de aproximadamente 30 m).....	17
Figura 3. 3. Curva hipsométrica adimensional del área de estudio. ....	19
Figura 3. 4. Histograma de frecuencias altimétricas del área de estudio.....	19
Figura 3. 5. Perfil longitudinal desde la cabecera al punto de control del tramo más largo, en el que se incluye la pendiente particular de cada tramo. ....	19
Figura 3. 6. Red de drenaje del área de estudio en la que se incluyen cursos primarios y secundarios.....	22
Figura 3. 7. Evolución de la superficie de área sembrada en primavera para la serie 1969/70-2010/11. Elaboración propia en base a datos de SIIA (2012). ....	24
Figura 3. 8. Evolución de la superficie de área sembrada en verano para la serie 1969/70-2010/11. Elaboración propia en base a datos de SIIA (2012). ....	24
Figura 3. 9. Balance hídrico para la estación “Pergamino NH145” considerando el año hidrológico (1957-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012).....	27
Figura 3. 10. Hidrograma medio anual en base a datos de la estación “N° HL 4035” (1963-2002) y Flamenco (2012).....	28
Figura 4. 1. Representación esquemática del balance de agua anual del modelo SWAT calibrado para la cuenca Arrecifes. Elaboración propia obtenida de la salida de la interface gráfica del programa SWAT.....	30
Figura 4. 2. Marcha diaria de la serie de caudal. ....	34
Figura 4. 3. a) Datos SRTM-C, los tonos más blancos corresponden a superficie elevada debida a montes. b) Los tonos rojos oscuro corresponden a montes de eucalipto visualizados en una imagen Landsat 5 TM en composición de falso color (R: 4 V: 5 A: 3). ....	36
Figura 4. 4. a) Datos SRTM-C originales. b) Identificación y delimitación de ruidos.....	37

Figura 4. 5. a) Extracción de los polígonos que fueron establecidos como ruido. b) DEM final luego de rellenar los datos faltantes mediante técnicas de interpolación. ....	37
Figura 4. 6. a) Imagen base, en azul se muestran áreas de entrenamiento representativas para la clase trigo, b) Imagen Landsat 5 TM+ en composición de falso color (R:4 V:5 A:3). ....	39
Figura 4. 7. Representación de cada clase sobre imagen Landsat 5 TM en composición falso color (R: 4 V: 5 A: 3). a) trigo, b) maíz, c) soja, d) girasol, e) recursos forrajeros, f) suelo desnudo, g) áreas urbanas, h) agua y i) montes. ....	41
Figura 4. 8. Dimensiones del canal (Neitsch et al., 2011). ....	47
Figura 4. 9. Llanura de inundación del canal (Neitsch et al., 2011). ....	47
Figura 4. 10. Medición del ancho de los canales sobre imagen de alta resolución de Google Earth. ....	48
Figura 4. 11. Imágenes de dirección y acumulación de flujo a partir de un MDE (ESRI, 2013). ....	49
Figura 4. 12. Puntos de cierre para la definición de subcuencas a partir de las principales series de suelo. ....	51
Figura 5. 1. Marcha diaria de las series de precipitación. a) Estación meteorológica NH0145, b) Estación meteorológica NH0453. ....	70
Figura 5. 2. Marcha diaria de las series diferencias de temperatura para la Estación meteorológica NH0145. a) Diferencia de máximos, b) diferencia de mínimos. ....	71
Figura 5. 3. Serie de precipitación total anual y tendencia lineal de la estación “Pergamino NH0145” (1957-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012). ....	72
Figura 5. 4. Serie de precipitación total anual y tendencia lineal de la estación “Junín NH053” (1959-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012). ....	72
Figura 5. 5. Marcha diaria de la serie de caudal en la que se identifican los outliers máximos y mínimos. ....	73
Figura 5. 6. Serie de aportación media anual y tendencia lineal de la estación “N° HL 4035” (1963-2002). Elaboración propia en base a datos del ADA. ....	73
Figura 5. 7. Mapa de pendientes derivadas del MDE. ....	74
Figura 5. 8. Mapa de uso de suelo para el período invernal (campaña 2006-2007). ....	75
Figura 5. 9. Mapa de uso de suelo para el período estival (campaña 2006-2007). ....	76
Figura 5. 10. Mapa de tipos de suelos a nivel de serie. ....	78
Figura 5. 11. Mapa de subcuencas, outlets y cierre de cuenca. ....	80
Figura 5. 12. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período calibrado. ....	84
Figura 5. 13. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período validado. ....	86
Figura 5. 14. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período de uso. ....	87
Figura 5. 15. Distribución espacial de la HSS (lámina de agua) dentro de la cuenca. ....	87

Figura 5. 16. Evolución temporal del índice de precipitación estandarizado y promedios móviles del SPI 3 durante 1982-1998 calculado con datos de la estación meteorológica NH0145.....	89
Figura 5. 17. Evolución temporal del índice de precipitación estandarizado y promedios móviles del SPI 3 durante 1982-1998 calculado con datos de la estación meteorológica NH0453.....	89
Figura 5. 18. Distribución espacial del NDVI dentro de la cuenca. ....	90
Figura 5. 19. Gráfico de dispersión para los factores de peso 1 y 2. ....	91
Figura 5. 20. Variación de pseudo-F en función del número de grupos k.....	91
Figura 5. 21. A la izquierda se puede observar la media graficada obtenida en cada grupo. Mientras que a la derecha se puede ver la distribución espacial de los grupos dentro de la cuenca. ....	92
Figura 5. 22. Correlación entre aNDVI y SPI a nivel de subcuenca. ....	93
Figura 5. 23. Correlación entre aNDVI y SPI a nivel mensual. ....	94
Figura 5. 24. Correlación entre aNDVI (lag 1) y SPI 3 a nivel mensual por grupo. ....	95
Figura 5. 25. Correlación entre aHSS y SPI a nivel mensual. ....	97
Figura 5. 26. Correlación entre aHSS y aNDVI a nivel mensual. ....	98
Figura 5. 27. Correlación entre aHSS y aNDVI (lag 1) a nivel mensual por grupo.....	99
Figura 6. 1. Evolución mensual de la aHSS, la aNDVI, SPI 1, SPI 3 y precipitación para el periodo 1982-1998.....	110
Figura 6. 2. Evolución mensual de la aHSS, la aNDVI, SPI 1, SPI 3 y precipitación para el ciclo agrícola de los años 1983/84 y 1984/85.....	111

## Índice de Tablas

Tabla 3. 1. Población total para los partidos que incluye de la cuenca del río Arrecifes. Elaboración propia en base a datos de INDEC (2011). ....	15
Tabla 3. 2. Valores de los principales parámetros morfológicos de forma y relieve.....	18
Tabla 3. 3. Principales afluentes del área de estudio. ....	21
Tabla 3. 4. Principales variables climáticas de la estación “Pergamino NH145” para el período 1957-2011. Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012). ....	26
Tabla 4. 1. Variables climáticas en las unidades especificadas por SWAT. ....	32
Tabla 4. 3. Variables climáticas requeridas por WGNmaker4 en las unidades especificadas. .	33
Tabla 4. 4. Datos satelitales utilizados.....	39
Tabla 4. 5. Prácticas agrícolas consideradas en el modelo SWAT. En la columna Rotación las letras indican tipos diferentes de rotaciones, y los números indican años consecutivos de la rotación. Elaboración propia con información derivada de las Guías prácticas de cultivos de Girasol, Maíz, Soja y, Trigo (INTA et al., 1997 a, b, c, d). ....	45

Tabla 4. 6. Valores de SPI y probabilidad acumulada asociados a una determinada categoría de severidad. ....	65
Tabla 5. 1. Superficie de las diferentes clases de uso de suelo para el período 2006-2007. ....	77
Tabla 5. 2. Composición de las clases suelo en el área de estudio. ....	79
Tabla 5. 3. Principales parámetros de las subcuencas del río Arrecifes. ....	80
Tabla 5. 4. Parámetros seleccionados para la calibración del modelo. ....	81
Tabla 5. 5. Rango (inicial y final) y ajuste final del factor de variación de cada parámetro seleccionado en el proceso de calibración con SUFI-2. ....	83
Tabla 5. 6. t-Stat, P y ranking de cada parámetro obtenidos en el proceso de análisis de sensibilidad global con SUFI-2. ....	85
Tabla 5. 7. Frecuencia de casos de eventos por categoría para el periodo 1979-1998. ....	88
Tabla 5. 8. Autovalores y porcentajes de varianza explicados y acumulados para las primeras 2 CP. ....	90
Tabla A1. 1. Descripción del archivo de entrada de precipitación (Arnold et al., 2011). ....	119
Tabla A1. 2. Descripción del archivo de entrada de temperatura (Arnold et al., 2011). ....	120
Tabla A1. 3. Descripción del archivo de entrada de velocidad de viento (Arnold et al., 2011). ....	121
Tabla A1. 4. Descripción del archivo de entrada de humedad relativa (Arnold et al., 2011). ....	121
Tabla A1. 5. Descripción del archivo de entrada de radiación solar (Arnold et al., 2011). ....	122
Tabla A1. 6. Archivo madre para vincular variables, estaciones meteorológicas y WGNmaker4 (Fuente: Manual WGNmaker4). ....	123
Tabla A1. 7. Formato de datos de entrada al WGNmaker4 (Fuente: Manual WGNmaker4). ....	124
Tabla A1. 8. Parámetros incluidos dentro de la tabla urban (Arnold et al., 2011). ....	125
Tabla A1. 9. Parámetros incluidos dentro de la tabla crop (Arnold et al., 2011). ....	126
Tabla A1. 10. Parámetros incluidos dentro de la tabla sol (Arnold et al., 2011). ....	128
Tabla A2. 1. Parámetros iniciales y generales incluidos dentro de la tabla mgt1 (Arnold et al., 2011). ....	130
Tabla A2. 2. Parámetros de los esquemas de manejo de las operaciones incluidos dentro de la tabla mgt2 (Arnold et al., 2011). ....	131
Tabla A2. 3. Parámetros de los acuíferos superficial y profundo incluido dentro de la tabla gw (Arnold et al., 2011). ....	134
Tabla A2. 4. Características físicas de los cursos de agua incluidas dentro de la tabla rte (Arnold et al., 2011). ....	135
Tabla A4. 1. Soil Water. ....	136

## Resumen

---

La actividad agropecuaria es altamente vulnerable a las condiciones meteorológicas, y especialmente a los eventos extremos (p.e. sequías). En los últimos años, se han registrado profundos cambios en los agrosistemas de la región pampeana. La expansión de la agricultura hacia ambientes más frágiles, o marginales, trajo aparejada un incremento de las emergencias agropecuarias, especialmente en las nuevas áreas productivas, las cuales se ven expuestas a fenómenos extremos vinculados al cambio climático y al cambio en el uso del suelo. El uso combinado de herramientas en el estudio de las sequías (p.e. índices de sequía y humedad de suelo), permite cuantificar el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos y reducir así la incertidumbre en los resultados de las estimaciones. El objetivo de este trabajo fue evaluar a nivel de cuenca la aptitud del modelo SWAT (*The Soil and Water Assessment Tool*), utilizado junto a otros indicadores de sequía, como herramienta para la detección y caracterización de sequías agrícolas en la región pampeana. La metodología comprendió tres etapas: (i) implementación del modelo SWAT para la obtención de una serie histórica de humedad de suelo simulada (HSS); (ii) el análisis espacio-temporal del índice de precipitación estandarizado SPI y del índice de vegetación de normalizado (NDVI); (iii) el análisis de las correlaciones entre los índices SPI y NDVI con la HSS. El resultado de la calibración ( $R^2$  0,69 y NSE 0,67) y validación ( $R^2$  0,75 y NSE 0,72) a escala temporal mensual indicó un buen desempeño del modelo. El estudio del análisis espacio-temporal del SPI y NDVI permitió, por un lado, identificar y clasificar episodios de sequías dentro del periodo (1982-1998) y, por el otro, agrupar subcuencas a partir de la vegetación para estudiar su comportamiento. El análisis de la performance del modelo SWAT, en la detección y caracterización de sequías, se realizó mediante las correlaciones entre la HSS y el índice de sequía (SPI 3) e índice verde (NDVI). De esta manera, se encontraron correlaciones positivas y significativas (con resultados  $>$  a 0,6) entre HSS y el SPI, y correlaciones positivas pero menos significativas entre HSS y NDVI. Esta tesis, mostró que SWAT es una herramienta idónea para ser aplicada en la región pampeana. Así como válida para estimar en forma semidistribuida la humedad del suelo. Asimismo, la tesis demostró que la metodología implementada contribuye al estudio de las sequías de la región pampeana, aporta una nueva herramienta para su monitoreo y al tiempo que abre nuevas líneas de investigación, como por ejemplo, el estudio de la relación entre la HSS e índices asociados al rendimiento del cultivo.

## Abstract

---

Agricultural activity is highly vulnerable to weather conditions, especially to extreme events (e.g. droughts). In the last years, there have been significant changes in agricultural systems of the Pampas region. The expansion of agriculture into fragile environments, provoked an increase in agricultural emergencies, especially in new production areas, which are exposed to extreme events linked to climate change and modifications in land uses. The combined use of different approaches in the study of drought (e.g. drought indices and soil moisture characterization), would allow quantify the impact of weather phenomena and reduce the uncertainty in the results. The aim of this study was to assess at level basin, the ability of “The Soil and Water Assessment Tool” (SWAT), used alongside other drought indicators, as a tool for the detection and characterization of agricultural droughts in the Pampas region. The methodology used consisted of three stages: (i) the SWAT model implementation to obtain a long term record of the simulated soil moisture (HSS); (ii) analysis of the spatio-temporal variation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); (iii) analysis of the correlations between SPI and NDVI indices with HSS. The results obtained in calibration ( $R^2$  0.69 and NSE 0.67), as well as in validation ( $R^2$  0.75 and NSE 0.72) were reasonable good. They showed a good performance of the model at the monthly time scale. The analysis of the spatio-temporal variability of SPI and NDVI allowed identifying and classifying episodes of drought during the period (1982-1998), and also allowed clustering of subbasins based on vegetation to study their behavior. The SWAT model performance analysis, in terms of its capacity to detection and characterization of droughts, was performed using correlations between: HSS and SPI, and HSS and NDVI. As a result, it has been found significant positive correlations ( $> 0.6$ ) between HSS and SPI (three month), and also positive correlations between HSS and NDVI but less significant. This thesis has showed that SWAT is a suitable to be applied in the Pampas region, as well as valid to estimate soil moisture in a semi-distributed way. Also, the thesis has demonstrated that the implemented methodology contributes to the study of droughts in this region. Likewise, it provides a new tool for its monitoring, and opens new lines of research as for example the analysis of the correlations between HSS and crop yield indices).

## **Estructura de la Tesis**

Este documento ha sido elaborado según la estructura clásica de un trabajo de investigación.

En el *Capítulo 1* se expone la problemática de estudio y se plantean los objetivos generales y particulares de la tesis.

En el *Capítulo 2* se describe el estado del arte respecto a la sequía agrícola y los antecedentes en relación a las circunstancias regionales y locales, humedad de suelo, modelo SWAT, índice verde e índice de sequía.

En el *Capítulo 3* se describen las principales características de la cuenca elegida como área de estudio para la aplicación de la metodología: hidrografía; relieve; clima; suelos; vegetación, así como la información pluviométrica e hidrométrica utilizada en este trabajo.

En el *Capítulo 4* se detalla la metodología aplicada, incluyendo los procedimientos para la obtención de los datos de entrada, fundamentos teóricos e implementación del modelo SWAT, así como del índice de precipitación estandarizado, índice verde y correlación bivariada entre los índices y la humedad de suelo simulada con SWAT.

En el *Capítulo 5* se presentan los resultados derivados de la implementación del modelo, incluyendo el análisis de sensibilidad, calibración y validación de un periodo de estudio de veinte años (1979-1998). Asimismo, se muestran los resultados de la estimación de los índices SPI y NDVI, así como los resultados de la correlación entre estos índices y la humedad de suelo simulada con SWAT.

En el *Capítulo 6* se discuten los resultados obtenidos, así como las limitaciones y aportaciones en relación con las metodologías utilizadas.

En el *Capítulo 7* se exponen las conclusiones de esta Tesis. Mientras que finalmente en el *Capítulo 8* se presentan las líneas futuras de investigación. La memoria se completa con un listado de referencias bibliográficas y anexos.

## Capítulo 1

### Capítulo 1 Introducción

#### 1.1. Planteo de la problemática

Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), han mostrado evidencias sobre el incremento de eventos meteorológicos extremos y cambios abruptos del clima (Bates *et al.*, 2008). Los mismos son altamente inusuales provocando que en la región pampeana se den grandes inundaciones y fuertes sequías sin dar tiempo a una posible adaptación al incremento de la frecuencia de los eventos extremos (Magrin *et al.*, 2007). En los últimos años, se han registrado profundos cambios en los agrosistemas de la región pampeana. La transformación más importante ha consistido en el crecimiento del sector agrícola, el cual comienza en la década del setenta, habiéndose profundizado agudamente en los noventa. Lo anterior ha llevado a un desplazamiento de la frontera agrícola, a raíz de la sustitución de cultivos tradicionales, pasturas y bosques nativos por monocultivos de soja. La expansión de la agricultura hacia ambientes más frágiles, o marginales, trajo aparejada un incremento de las emergencias agropecuarias, especialmente en las nuevas áreas productivas, las cuales se ven expuestas a fenómenos extremos vinculados al cambio climático y al cambio en el uso del suelo.

La producción agropecuaria de Argentina durante los últimos 10 años, ha participado en el 8,7 % del Producto Bruto Interno (PBI) y en el 21 % del total de las exportaciones (Centro de Economía Internacional [CEI], 2011). Extensas superficies de las dedicadas a la actividad agropecuaria, se han visto afectadas reiteradamente por serios episodios de sequías, frecuentes sequías cortas e inundaciones que han anegado extensas áreas. La ocurrencia de esta tipología de eventos hidrometeorológicos, ha tenido un impacto en los productores, en la sociedad en general, y por extensión en la economía nacional. Como resultado, se han producido importantes pérdidas en las cosechas, reduciéndose el rendimiento esperado de los cultivos, al tiempo que de manera indirecta

## Capítulo 1

han quedado afectados los agrosistemas debido a la degradación de las tierras, que ha reducido la calidad y el potencial de producción de las mismas. Según Pérez Ballari *et al.* (2009) las sequías en la provincia de Buenos Aires durante el periodo 1996-2007, han producido las siguientes consecuencias: i) reducción del área triguera; ii) disminución del rendimiento productivo, pasando de 1.500 kg por hectárea a 500/800 kg por hectárea (años secos); iii) mortandad de animales, traslados y una prematura comercialización de la producción vacuna; iv) déficit en las reservas de forrajes; v) desbalance financiero por incumplimientos tributarios; y vi) propagación de plagas que afectan a los cultivos.

Ante situaciones extremas, el gobierno es el encargado de declarar la emergencia mediante la Ley Nacional N° 26.509 de “Emergencia y/o Desastre Agropecuario” en el área afectada. Esta Ley tiene como objetivo hacer frente a los daños causados por factores climáticos, meteorológicos y físicos, mediante algún instrumento impositivo o financiero. Uno de los problemas más graves que se ha identificado, es la falta de coincidencia entre organismos públicos y privados sobre los miles o millones de hectáreas afectadas, la cuantificación de los daños y la permanencia de los fenómenos meteorológicos. Por ende, existe la dificultad de poner en práctica en forma equitativa y objetiva la asignación de los subsidios. En este sentido, el uso de herramientas apropiadas en el estudio de las sequías, p.e. el uso combinado de índices de sequías junto a otros indicadores como la humedad del suelo o la humedad de suelo simulada, permite cuantificar el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos sobre las cuencas hidrológicas con uso agrícola y ganadero, aminorándose como resultado así la incertidumbre en los resultados de las estimaciones.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar a nivel de cuenca la aptitud de SWAT, utilizado junto a otros indicadores de sequía, como herramienta para la detección y caracterización de sequías agrícolas en la región pampeana.

## Capítulo 1

### 1.2.2. Objetivos específicos

- 1) Desarrollar un registro a largo plazo de la humedad del suelo, aplicando SWAT mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de la serie histórica de datos hidroclimáticos existente en la cuenca del río Arrecifes.
- 2) Analizar la variación en el espacio-tiempo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para así detectar periodos y zonas que sufrieron sequía agrícola.
- 3) Analizar la correlación existente entre los valores de humedad de suelo generados con SWAT y los valores que resulten de aplicar los índices SPI y el NDVI.

## Capítulo 2

### Capítulo 2 : Estado del arte

#### 2.1. La sequía agrícola

Las sequías son un riesgo climático, que tiene lugar en casi todas las regiones del mundo (Mavi y Tupper, 2004); y cuyas características de intensidad y frecuencia de ocurrencia dependen de cada región (Ravelo *et al.*, 1999). Se considera que es un fenómeno lento, que afecta a grandes regiones, y muy complejo en lo que a la evaluación de su severidad se refiere (Mavi y Tupper, 2004). En general, se habla de sequía cuando se produce una disminución natural de la precipitación en un período de tiempo extendido de al menos una estación respecto al aporte normal (Sivakumar *et al.*, 2005). Sin embargo, como usualmente no se analiza sólo el fenómeno físico, este término puede tener diferentes significados y ser muy controversial. Así, el concepto sequía incluye los aspectos que se enuncian a continuación: i) sequía meteorológica; ii) sequía agrícola; y iii) sequía hidrológica (Mavi y Tupper, 2004; Mishra *et al.*, 2007; Narasimhan, 2004; Sivakumar *et al.*, 2005).

En términos generales, estos autores definen sequía meteorológica como aquel periodo en el cual la cantidad de días con precipitación es menor que el normal, o que la cantidad promedio esperada. Por tanto, la sequía hidrológica se produce cuando durante un periodo de tiempo, se observa un déficit de agua superficial y subterránea, afectando a la demanda de agua para propósitos específicos. Por sequía agrícola, se entiende aquella que se origina cuando la humedad en el suelo no alcanza a cubrir las necesidades de los cultivos en un período particular. Se trata de un concepto complejo, que incluye factores meteorológicos, agrícolas, ambientales y antropogénicos asociados al uso del suelo (Das *et al.*, 2003). Además, es el primer factor que afecta a la productividad agrícola. Este tipo de sequías pueden presentarse frecuentemente en distintas épocas fenológicas de los cultivos, afectando a diferentes áreas y generando mermas significativas en la producción.

## Capítulo 2

Los investigadores anteriormente mencionados, han manifestado la necesidad de evaluar las sequías mediante el análisis de una combinación de herramientas que permitan su caracterización. En agricultura, esto es muy importante debido a que la mayor parte de las veces se emplea un sólo indicador para la cuantificación de sequías, que usualmente únicamente se basa en una o dos variables meteorológicas. Sin embargo, y a pesar de su importancia, no se tiene en cuenta la cantidad disponible de humedad en la zona de raíces del suelo, aun siendo éste el factor más crítico para el crecimiento de los cultivos. Generalmente, esta información se encuentra sólo a escala local o de forma puntual. Además, es un parámetro altamente variable espacial y temporalmente (Narasimhan *et al.*, 2005). Un estudio más eficiente de la intensidad, duración y magnitud de las sequías, debería evaluar conjuntamente humedad de suelo (información que puede ser derivada de modelos hidrológicos semidistribuidos), índices de sequía, e índices verdes obtenidos a partir de sensores remotos.

### **2.1.1. Simulación de la humedad del suelo**

La humedad del suelo es un excelente indicador de la sequía agrícola, ya que es una medida que depende de variables meteorológicas (precipitación y evapotranspiración), propiedades del suelo (capacidad de almacenamiento de agua, textura, estructura y desarrollo), vegetación presente y manejo de la tierra (Narasimhan *et al.*, 2005). Asimismo, es un parámetro hidrológico importante que controla diversos procesos del ciclo hidrológico. A nivel superficial, es un factor crítico en la interacción con la atmósfera, mientras que en la zona radicular condiciona la cobertura y el estado de la vegetación (Schnur *et al.*, 2010). Tradicionalmente, la humedad del suelo se ha medido en forma puntual y esta información ha resultado muy útil localmente (Bono *et al.*, 2010). Sin embargo, a escalas mayores se han utilizado diferentes técnicas geoestadísticas de interpolación y regresión para conocer su distribución espacial como las descritas por Yi-Ju *et al.* (1997). No obstante, este tipo de aproximaciones metodológicas tienen un alto

## Capítulo 2

coste debido a la elevada densidad de puntos de medición requeridos para la obtención de resultados óptimos.

En las últimas décadas, se han desarrollado numerosos modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos, continuos o de eventos y físicamente basados. Con los últimos avances, estos modelos se han comenzado a explorar como posible herramienta para estimar el contenido de agua en el suelo. A este respecto, cabe destacar:

- VfloTM: modela procesos con alta resolución espacial, aprovechando la accesibilidad a diversa información geoespacial detallada de radar u otros sensores remotos, y datos derivados de ellos (Vieux Inc, 2010).
- SWAT (*The Soil and Water Assessment Tool*): desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el *U.S. Department of Agriculture* (USDA) (Arnold *et al.*, 1993). Su propósito principal es predecir en el largo plazo temporal el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la calidad del agua; y la emisión de sedimentos de cuencas grandes y complejas (Neitsch *et al.*, 2011).
- ANSWERS-2000 (*Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*): desarrollado por Bouraoui y Dillaha (1996). Evalúa los efectos de las prácticas de manejo agrícola y urbano en la emisión de sedimentos y nutrientes a las corrientes por escurrimiento superficial, así como la lixiviación de nitrógeno a través de la zona de las raíces.
- AGNPS (*Agricultural Non-Point Source*): desarrollado por el *United States Department of Agriculture* (USDA) en cooperación con *Minnesota Pollution Control Agency and the Natural Resource Conservation Service* (NRCS). Simula eventos, permitiendo analizar y estimar la calidad del agua de medianas y grandes cuencas agrícolas (Young *et al.*, 1987).

## Capítulo 2

### 2.1.1.1. Modelo SWAT

SWAT es uno de los modelos más difundidos entre los investigadores que trabajan en temas relacionados con la agricultura; y ha sido aplicado y validado en numerosas cuencas, de diferentes tamaños y bajo diversas condiciones hidrológicas (Neitsch *et al.*, 2011). Como ventajas adicionales, cabe destacar la fácil disponibilidad de los *inputs* de ingreso al modelo, el nivel de detalle espacial alcanzado, la capacidad de simular escenarios de crecimiento de cultivos y manejo de la tierra (Narasimham, 2004), así como su integración en una interfaz SIG. Es un modelo semidistribuido, físicamente basado, y que a escala temporal simula en tiempo continuo. Como datos elementales de entrada, requiere información espacialmente distribuida de: suelo; uso del suelo y elevación del terreno. Además, necesita de la incorporación de datos climáticos (precipitación, temperatura, velocidad del viento, radiación solar).

Se considera que SWAT es un modelo adecuado para simular a nivel de subcuenca la humedad del suelo en la zona de raíces y realizar el monitoreo de las sequías agrícolas (Jha, 2012; Ming Xing *et al.*; 2010; Narasimham *et al.*, 2005). Estos autores han implementado exitosamente el modelo SWAT para simular la humedad de suelo en diferentes cuencas y regiones, y para un periodo de tiempo suficientemente representativo. Al comparar datos observados o provenientes de otras fuentes (tales como sensores remotos) con los simulados, encontraron que el modelo puede generar datos a largo plazo de humedad del suelo consistentes desde un punto de vista de su variabilidad espacio-temporal.

### 2.1.3. Índice de sequía

Numerosos organismos nacionales e internacionales y grupos de investigación dedicados al monitoreo de las sequías, han adoptado o desarrollado diversos índices para cuantificar la condición de humedad en una región y detectar la aparición de eventos severos (Mavi y Tupper, 2004; Mishra *et al.*, 2007; Narasimhan, 2004), así como para

## Capítulo 2

determinar la extensión espacial del fenómeno (Quiring y Papakryiakou, 2003). En general, todas las metodologías de cálculo integran parámetros meteorológicos e hidrológicos (Narasimhan, 2004). Entre las más usadas para actividades de manejo de recursos hídricos, monitoreo agrícola y previsión se pueden citar: el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PSDI, *Palmer Drought Severity Index*), que permite medir la pérdida de humedad del suelo (Palmer, 1965); el Índice de Humedad del Cultivo (CMI, *Crop Moisture Index*), que es un indicador que permite hacer un seguimiento semanal de las condiciones de los cultivos (Palmer, 1968); el Índice de Suministro de Agua Superficial (SWSI, *Surface Water Supply Index*), que estima las condiciones de humedad superficial (Shafer y Dezman, 1982); y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, *Standardized Precipitation Index*), que es un indicador espacial de la sequía (McKee *et al.*, 1993).

Tanto Mishra *et al.* (2007) como Skansi *et al.* (2006) consideran que el índice SPI es adecuado, tanto para el estudio de sequías cortas (significativas en la agricultura) como prolongadas (relevantes para el manejo de recursos hídricos). En los últimos tiempos, se ha convertido en una herramienta cada vez más importante para la evaluación de la condición de humedad y el inicio de acciones de respuesta a la emergencia. Además, es uno de los índices más simples de calcular, debido a que sólo requiere datos de lluvia y es espacialmente invariante (Quiring y Papakryiakou, 2003; Skansi *et al.*, 2006). Su estimación consiste en el ajuste de la serie de precipitación a una distribución teórica apropiada, seguido de su posterior transformación en una distribución normal estandarizada. Esta estandarización asegura, por un lado, que la determinación de la frecuencia de los eventos extremos sea consistente y, por el otro, detecta los déficit de humedad rápidamente (Mishra *et al.*, 2007). Núñez *et al.* (2005) analizaron el SPI para la estación meteorológica de Buenos Aires (serie 1861-2004) y concluyeron que es adecuado para la identificación y seguimiento de eventos secos y húmedos en la región húmeda argentina.

## Capítulo 2

### 2.1.4. Índice verde

Conjuntamente al avance de las ciencias hídricas, la teledetección satelital ha tenido un gran auge en aquellas disciplinas dedicadas al monitoreo de la superficie de la tierra, especialmente desde el inicio del uso de imágenes provenientes del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). Este sensor fue montado en la plataforma *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) en los años 70. A partir de los datos satelitales se han elaborado diversos Índices de Vegetación (IV), que han demostrado ser útiles como indicadores del estado de la vegetación (Jackson y Huete, 1991; Liu y Kogan, 1996; Seiler y Kohan, 2002; Tucker y Choudhury, 1987; Weiss *et al.*, 2004); en el monitoreo del medio ambiente (Seiler *et al.*, 1998; 2000), así como en la caracterización de fenómenos tales como el estrés vegetacional y sequía (Bajgirana *et al.*, 2008; Bhuiyan *et al.*, 2006; Rulinda *et al.*, 2012; Seiler *et al.*, 1998; Tucker y Anyamba, 2005).

Uno de los índices de vegetación más difundidos es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) (Tarpley *et al.*, 1984). Autores como Bajgirana *et al.* (2008) y Tucker y Choudhury (1987), han encontrado una buena relación entre el índice NDVI y la lluvia, así como entre NDVI y la humedad de suelo (Schnur *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2007). Además, el índice NDVI ha sido utilizado exitosamente para identificar y seguir áreas a nivel regional y local afectadas por sequía (Bajgirana *et al.*, 2008; Bayarjargal *et al.*, 2006; Rulinda *et al.*, 2012; Seiler *et al.*, 2000; Tucker y Anyamba, 2005; Unganai y Kogan, 1998). Narasimham (2004) aplicó SWAT en 6 cuencas de Texas, encontrando una buena correlación entre el NDVI y la disponibilidad de agua simulada en cultivos y pasturas. Asimismo, pudo comprobar que, cuando los datos no están disponibles, el NDVI es un buen indicador para evaluar la aptitud de los modelos hidrológicos para predecir la disponibilidad de agua en el suelo.

## Capítulo 2

### 2.2. Circunstancias regionales y locales

Ameghino (1884) y Moncaut (2003) describieron grandes períodos de sequías en la provincia de Buenos Aires desde tiempos inmemorables, como resultado de la irregularidad de la precipitación y de la rápida evaporación del agua que cae en las épocas lluviosas. Así, desde 1576 se ha recopilado documentación histórica de cartas, relatos de viajeros y actas. Al respecto, es interesante mencionar la “Gran Seca” descrita en 1839 por Darwin (1845), que duró de 1827 a 1832 y afectó al norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. El naturalista relata: *“en ese tiempo cayó tan poca lluvia, que la vegetación desapareció y los cardos dejaron de brotar, mientras que gran número de aves, de animales salvajes y de ganado vacuno y caballar murieron de hambre y de sed”*. Las observaciones pluviométricas comenzaron a registrarse a principios del siglo XIX, aunque no es a partir de 1861 cuando empiezan a ser sistemáticas. Sin embargo, en un estudio realizado por Ravelo *et al.* (1999), en el que analizaron las sequías ocurridas en la región pampeana durante el periodo 1930-1990, se observó que hubo una marcada tendencia en la disminución de su severidad.

Tradicionalmente, el proceso de expansión de la frontera agropecuaria en Argentina, dependió de los precios internacionales de los granos, los cuales determinaron las actividades a realizar en las explotaciones zonales. No obstante, a partir de 1970 la agricultura experimentó un marcado corrimiento hacia el oeste, penetrando en zonas tradicionalmente ganaderas. El mayor cambio en los agrosistemas regionales tuvo que ver con la sustitución de pasturas naturales y algunos cultivos anuales por otros cultivos de preferencia estival. Un estudio de correlación entre el clima, el precio de los granos y los avances tecnológicos en el centro pampeano realizado por Viglizzo *et al.* (1995), estableció que este cambio se produjo principalmente debido a que las condiciones hidrológicas globales de la región se vieron favorecidas (especialmente en las áreas semiáridas). Esta

## Capítulo 2

situación la atribuyeron al incremento en la humedad del suelo, a las menores pérdidas por evapotranspiración y a los avances e innovaciones de ciertos factores tecnológicos.

Estudios como el de Castañeda y Barros (1994) han corroborado lo anterior, al advertir tendencias positivas anuales de la precipitación en el Cono Sur de América durante el período 1916-1991, incrementándose estadísticamente la precipitación a fines de la década de los cincuenta. De este modo, demostraron el desplazamiento del núcleo positivo hacia el noreste del país desde el verano al invierno. La concordancia de estos desplazamientos estacionales con las isohietas medias mensuales, es un indicador de que algunas de las características de la circulación que influyen sobre la variación estacional de la precipitación se han intensificado durante los últimos 35 años. Sin embargo, las sequías han continuado ejerciendo sus efectos recurrentemente. A principios de los años 70 y 80, mediados de los 90 y durante la última década, la región pampeana se ha visto afectada por sequías intensas. Así, durante 2008 las precipitaciones de la zona húmeda y semihúmeda del país fueron las más bajas de los últimos 47 años (Ministerio de Agricultura y Pesca [MAGyP], 2011), manifestándose de este modo la constante amenaza de padecer fuertes sequías agrícolas.

## Capítulo 3

## Capítulo 3 : Área de estudio

### 3.1. Características generales y ubicación

El área de estudio se ubica dentro de la “Cuenca del río Arrecifes” (Figura 3.1). La superficie total de la cuenca es de aproximadamente 10.700 km<sup>2</sup>. Se localiza al norte de la provincia de Buenos Aires, entre los 33° 36' y 34° 35' de latitud sur y 59°31' y 61°28' de longitud oeste. Su denominación evoca a los afloramientos rocosos existentes en el lecho del río, similares a los arrecifes, los cuales dieron origen a su nombre en el siglo XVI por los primeros españoles que llegaron al continente.

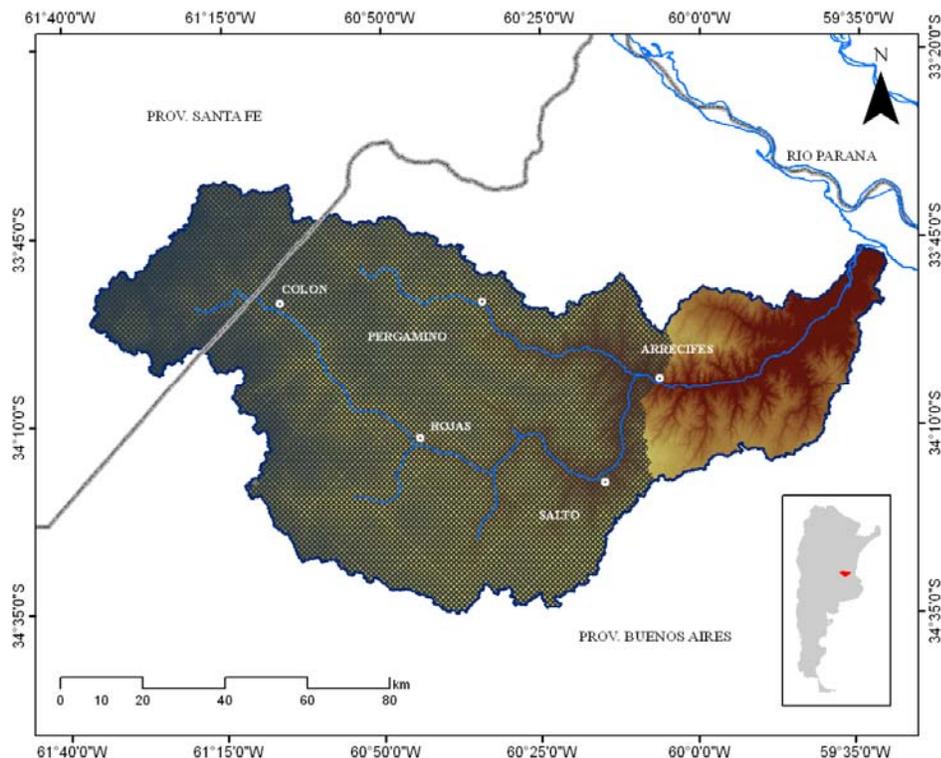


Figura 3. 1. Ubicación geográfica del área de estudio situada dentro de la cuenca del río Arrecifes.

La cuenca del río Arrecifes limita al N y al SE con el sistema de cuencas de arroyos del sudeste de Santa Fe y norte de Buenos Aires, y al oeste con la cuenca del río Salado de Buenos Aires. Esta cuenca pertenece a la región natural de la Pampa Ondulada Alta (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2009). El relieve es de planicies

### Capítulo 3

suavemente onduladas, recortadas por cañadas y arroyos que confluyen al cauce principal que desemboca en la región del Delta, en el río Paraná de las Palmas, y éste en el río de la Plata. La cuenca se caracteriza por presentar una buena densidad de drenaje, siendo 243 km la longitud total del cauce más largo. Presenta sus nacientes en la divisoria que la separa de la cuenca del río Salado, mientras que el sentido principal de drenaje es SE-NE.

Algunos sectores de la parte alta y media de la cuenca presentan un relieve llano. Por otro lado, la parte inferior y la desembocadura se asocian a un ambiente litoral y de llanura deltaica. El sustrato de toda la región, sobre el que se formaron las actuales líneas de drenaje, está compuesto por sedimentos asignados a la Formación Pampeano. Puntualmente puede estar cubierta por escasos metros de la Formación La Postrera y depósitos fluviales holocenos (Ameghino, 1884; González Bonorino, 1965), que revelan la escasa historia geológica de la región. Las condiciones morfológicas, con pendientes que no superan el 2 % y las características edafológicas y geológicas, favorecen el proceso de infiltración y recarga, resultando en buenas reservas de agua subterránea en casi toda la zona.

#### **3.2. Aspectos sociales y económicos**

El área de estudio se encuentra conformada por 10 partidos, de los cuales sólo los de Arrecifes, Colón, Pergamino, Rojas y Salto tienen sus ciudades cabeceras dentro de la cuenca (Figura 3.1). La población actual, según los datos extraídos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC], 2011) es de 214.609 habitantes. En la Tabla 3.1 se muestra la variación poblacional respecto al último censo, siendo la ciudad más importante Pergamino. La cuenca del Arrecifes, por encontrarse dentro de una zona de alta producción agropecuaria e industrial, posee vías de comunicación que la ligan a las principales ciudades del país. En

## Capítulo 3

general, debido al buen desarrollo económico de la región, los niveles de Producto Bruto Interno y calidad de vida son superiores al promedio nacional.

Tabla 3. 1. Población total para los partidos que incluye de la cuenca del río Arrecifes. Elaboración propia en base a datos de INDEC (2011).

<b>Partido</b>	<b>Población</b>		<b>Var. Relativa (%)</b>
	<b>2001</b>	<b>2010</b>	
Arrecifes	27.279	29.044	6,5
Chacabuco	45.445	48.703	7,2
Colón	23.179	24.890	7,4
General Arenales	14.876	14.903	0,2
Junín	88.664	90.305	1,9
Salto	29.189	32.653	11,9
Pergamino	99.193	104.590	5,4
Rojas	22.842	23.432	2,6
Constitución	83.045	86.910	4,7
General López	182.113	191.024	4,9
<b>Total</b>	<b>615.825</b>	<b>646.454</b>	<b>4,7</b>

Entre las principales actividades económicas cabe destacar la actividad agropecuaria, industrial metalúrgica y textil. Esta última con un crecimiento importante hasta la década de los noventa, aunque luego debido a la competencia asiática y a la recesión de 1998, se fue debilitando (Gennero de Rearte y Graña, 2007). La agricultura presentó un gran impulso en esta misma década, debido a la política macroeconómica del momento que incluía la apertura, desregulación y reforma del Estado, así como la ausencia de políticas sectoriales. Durante esos años se observó un sostenido avance de la frontera sojera en base al uso del paquete tecnológico de la siembra directa, materiales transgénicos tolerantes y al glifosato, marcando una tendencia sostenida hacia la especialización y mono-producción.

Por otra parte, en la cuenca se conformó un Comité de Cuenca, el cual surgió como iniciativa de la Autoridad del Agua (ADA). Su nacimiento, como el del resto de los comités de las cuencas en la provincia de Buenos Aires, no estuvo motivado por conflictos de uso sino del Código de Aguas provincial sancionado en 1999. A diferencia de otros

## Capítulo 3

Comité de Cuenca, por la recurrencia de fenómenos extremos que afectan la cuenca (tales como sequías duraderas, o caída de grandes cantidades de lluvia en poco tiempo que han provocado inundaciones extraordinarias), este Comité ha trabajado activamente junto a Municipios y organismos como ADA, Instituto Nacional del Agua (INA) e INTA, entre otros.

### **3.3. Características morfométricas de la cuenca**

#### **3.3.1. Superficie**

La superficie incluida en el área de estudio, hasta la sección de control, es de 8.742 km<sup>2</sup>, mientras que la longitud de su perímetro es de 881 km. El cálculo del área de la cuenca posibilita su utilización en la elaboración de varios índices. Chow *et al.* (1994) definen como cuencas pequeñas aquéllas con áreas menores a 250 km<sup>2</sup>, cuencas medias entre 250 y 2.500 km<sup>2</sup> y cuencas grandes las que poseen áreas mayores a los 2.500 km<sup>2</sup>. Esta superficie comprende los sectores altos y medios de la cuenca (Figura 3.2). El punto de salida, se localiza en el balneario de la localidad de Arrecifes, y corresponde a la “Estación río Arrecifes” N° HL 4035, que se ubica a 34° 04' 30" de latitud sur y 60° 06' 23" de longitud oeste, siendo la altitud de 21,15 m snm. La estación fue operada por ADA de la Provincia de Buenos Aires durante el período 1963-2002; y en la actualidad cuenta con una estación limnigráfica que es manejada en forma conjunta entre el INTA y el Comité de Cuencas del río Arrecifes.

## Capítulo 3

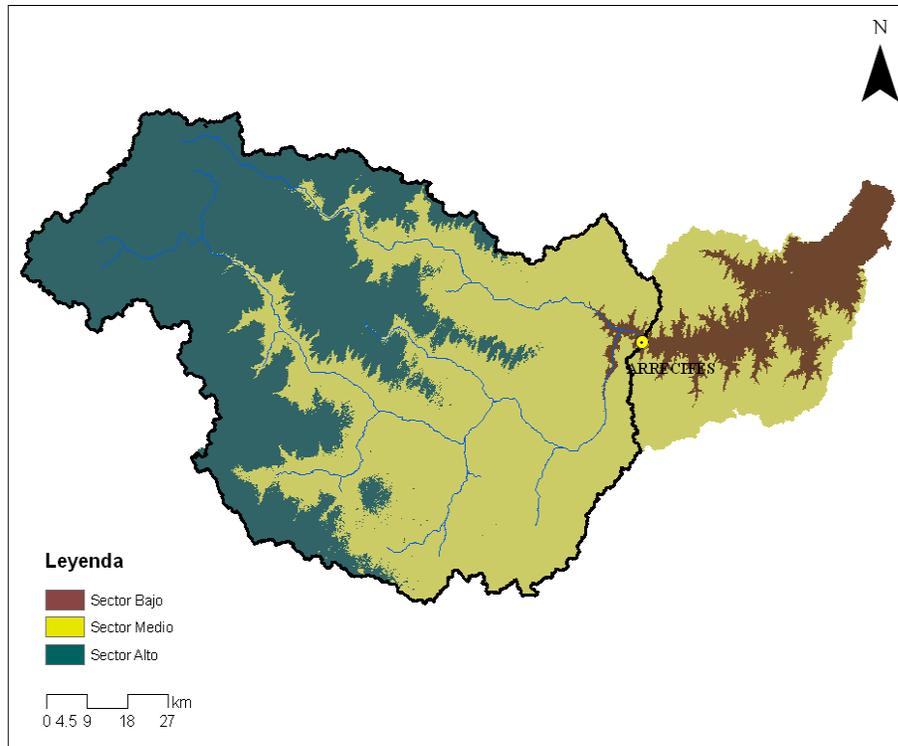


Figura 3. 2. Elevación altitudinal de la cuenca en el área de estudio. Elaboración propia a partir del MDE mediante el criterio de división por altitud, considerando tres intervalos de altura iguales (de aproximadamente 30 m).

### 3.3.2. Forma y Relieve

El área de estudio se ubica en un área típica de llanura. A partir del modelo digital de elevación (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 30 m de resolución espacial, se determinó que el punto más alto se encuentra a 105 m snm y el más bajo a 27,5 m snm (punto de salida). La longitud de la cuenca de drenaje que, a su vez, es coincidente con la máxima longitud de flujo, es de 176,9 km. Mientras que su ancho máximo es de 64,2 km. En la Tabla 3.2 se muestran algunos de los parámetros morfológicos determinados para esta Tesis con el fin de representar la forma y el relieve del área de estudio.

Los parámetros de forma expresan que la cuenca presenta gran irregularidad. La cuenca se puede asociar a una forma rectangular-oblonga, manifestando un ligero achatamiento. Estas características, hacen prever que la cuenca tendrá una respuesta lenta

## Capítulo 3

frente a precipitaciones abundantes, siendo poco propensa a crecidas repentinas. Mientras que, los parámetros de relieve indican que el tipo de terreno es llano (Heras, 1972).

Tabla 3. 2. Valores de los principales parámetros morfológicos de forma y relieve.

<b>Parámetro</b>	<b>Autor</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Característica</b>
Índice de Compacidad	(Gravelius, 1914)	Circularidad de la cuenca	Ic	2,01	Rectángulo-oblonga
Factor de Forma	(Horton, 1932)	Achatamiento de la cuenca	Ff	0,26	Achatamiento ligero
Pendiente media de la cuenca	(Horton, 1945)	Tipo de terreno	PM	0,4 %	Llano
Pendiente media del cauce		Tipo de terreno	PMc	0,00043	Llano

La curva hipsométrica adimensional construida de acuerdo con Strahler (1952), muestra que la cuenca recién está alcanzando el estado de equilibrio, indicando una actividad erosiva media a alta (Figura 3.3). Así, en el sector de altitud más bajo se observa un importante cambio de pendientes. A partir de la forma de la curva podría considerarse que el río comienza su fase de madurez. El histograma de frecuencias altimétricas representa una distribución acampanada con leve asimetría hacia la izquierda o negativa (Figura 3.4). El 59 % de la superficie se localiza entre los 58,7 m snm y los 78,7 m snm. Las alturas características reflejan la asimetría de la cuenca, la altura media ( $H_m$ ) es de 72,9 m snm y la mediana ( $H_{m50}$ ) es de 71,2 m snm. Así, la altura más frecuente se encuentra entre los 70 y 72,5 m snm. Por otro lado, la pendiente media del cauce más largo, determinada a partir del MDE, tomado desde la cabecera en Cañada del Charito al punto de control en el río Arrecifes es de 0,00033 m/m. El perfil longitudinal, incluyendo cursos intermedios, desde la cabecera al punto de control se representa en la Figura 3.5.

Capítulo 3

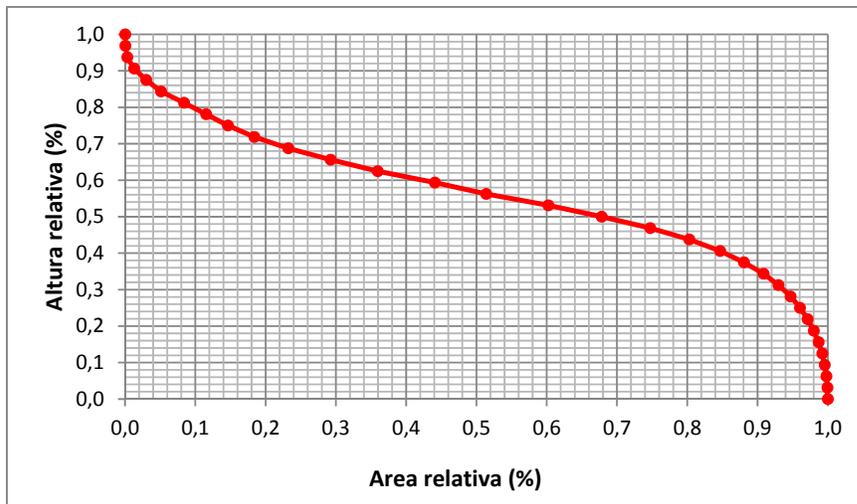


Figura 3.3. Curva hipsométrica adimensional del área de estudio.

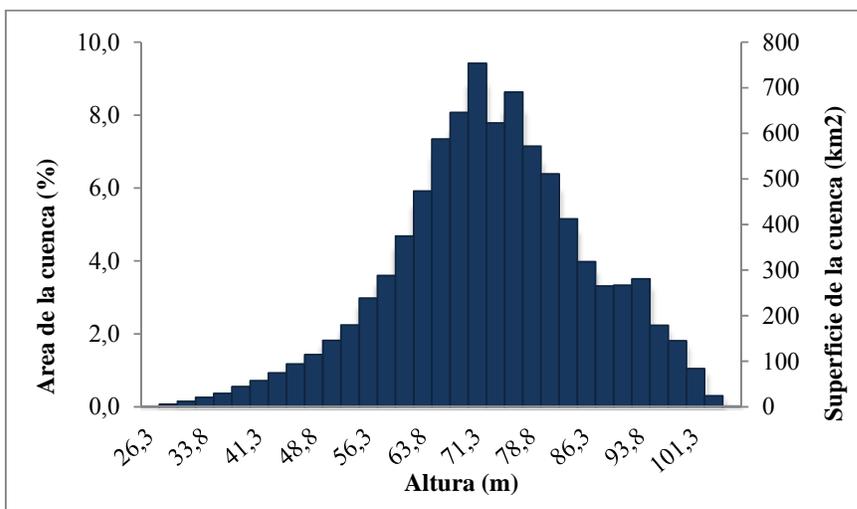


Figura 3.4. Histograma de frecuencias altimétricas del área de estudio.

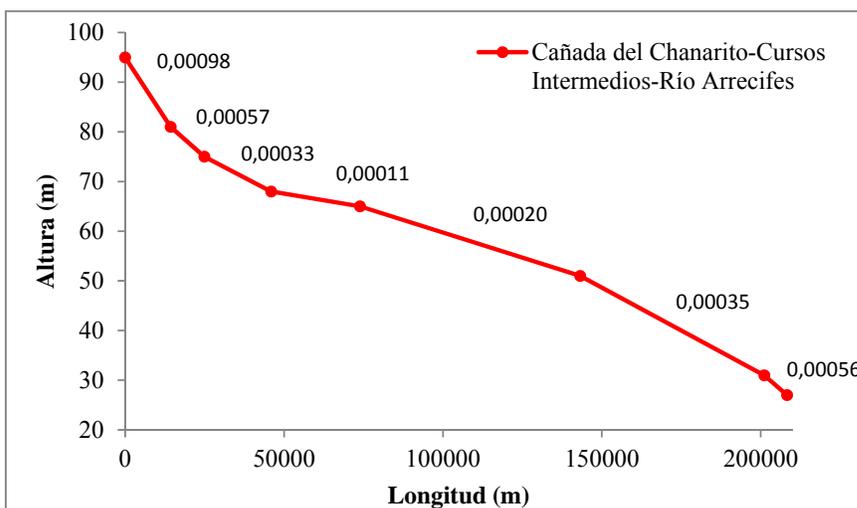


Figura 3.5. Perfil longitudinal desde la cabecera al punto de control del tramo más largo, en el que se incluye la pendiente particular de cada tramo.

## Capítulo 3

### 3.3.3. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración ( $t_c$ ) se define como el tiempo que pasa desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía directa. Representa el tiempo que tarda en llegar a la sección de control la última gota de lluvia que cae en el punto más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa. Como resultado, el tiempo de concentración se corresponde con el tiempo de equilibrio, o duración necesaria para que el caudal de escorrentía sea constante al tiempo que máximo. Para su cálculo se utilizaron las ecuaciones propuestas por Neitsch *et al.* 2011, de esta manera se calcula tomando en cuenta el tiempo de concentración superficial de la cuenca y del canal (Ecuación 3.1).

$$t_c = t_{ov} + t_{ch} \quad (3.1)$$

Dónde:  $t_c$  es el tiempo de concentración (horas),  $t_{ov}$  es el tiempo de concentración terrestre (horas), y  $t_{ch}$  es el tiempo de concentración del canal (horas).

El tiempo de concentración del flujo superficial se determinó utilizando la ecuación 3.2.

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0,6} * n^{0,6}}{18 * slp_{ov}^{0,3}} \quad (3.2)$$

Dónde:  $L_{slp}$  es la longitud de la pendiente de la cuenca (m),  $slp$  es la pendiente media (m/m) y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning de la superficie.

El tiempo de concentración del canal se determinó con la ecuación (3.3). Los autores, asumen que el canal posee una forma trapezoidal con una relación de 2:1 en sus laterales y una relación ancho de fondo y profundidad 10:1.

$$t_{ch} = \frac{0,62 * L * n^{0,75}}{area^{0,125} * slp_{ch}^{0,375}} \quad (3.3)$$

Dónde:  $L$  es la longitud del cauce más largo de la cuenca (km),  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning del canal,  $area$  es el área de cuenca ( $km^2$ ) y  $slp_{ch}$  es la pendiente media del canal (m/m).

Asimismo, estos autores basan el desarrollo matemático de las ecuaciones del  $t_c$  en consideraciones hidráulicas, se valen de algunas simplificaciones para el desarrollo de su

### Capítulo 3

fórmula, y además consideran que se obtienen resultados apropiados cuando es utilizada en cuencas y subcuencas de características homogéneas. En la cuenca del río Arrecifes, se asumieron los siguientes valores: coeficiente de Manning promedio para la superficie de 0,14 y para el curso natural de 0,020 (Chow, 1994), para la cuenca un  $L_{slp}$  de 210.000 m y  $slp_{ov}$  de 0,02 (obtenidos de la caracterización topográfica realizada por SWAT). El  $t_c$  calculado corresponde a 102 h (4,3 días).

#### 3.3.4. Sistema de drenaje

La cuenca del Río Arrecifes pertenece al Sistema Hidrológico del Paraná, habiendo sido catalogada como cuenca N°35 (Subsecretaría de Recursos Hídricos [SSRH], 2010). Además, se localiza en la región hídrica superficial N° II “Noreste” de la provincia de Buenos Aires determinada por Giraut *et al.* (2007). Es drenada por varios arroyos y por un curso natural de agua bien definido el “río Arrecifes”. Este cauce primario nace de la confluencia del Río Salto y del Arroyo Pergamino, localizándose su desembocadura en el río Paraná de las Palmas. La longitud total del curso más largo, tomado desde la cabecera al punto de control, es de 176,9 km. Mientras que la longitud total de la red de drenaje, incluyendo los cursos principales y secundarios, es de 1.795,4 km. Los principales afluentes del río Arrecifes se listan en la Tabla 3.3. En la Figura 3.6 se muestra la red de drenaje principal, incluyendo los cursos primarios y secundarios.

Tabla 3. 3. Principales afluentes del área de estudio.

<b>Nombre</b>	<b>Long. (km)</b>	<b>Nombre (continuación)</b>	<b>Long. (km)</b>
Arroyo El Pelado	27,9	Cañada Colón	21,1
Arroyo del Sauce	25,9	Cañada Paja Brava	10,6
Arroyo Dulce	20,9	Cañada del Chanarito	14,3
Arroyo Saladillo Chico	15,6	Río Arrecifes	7,2
Arroyo Saladillo de la Vuelta	58,2	Río Pergamino	146,4
Arroyo Saladillo Grande	26,5	Río Rojas	69,3
		Río Salto	57,9

## Capítulo 3

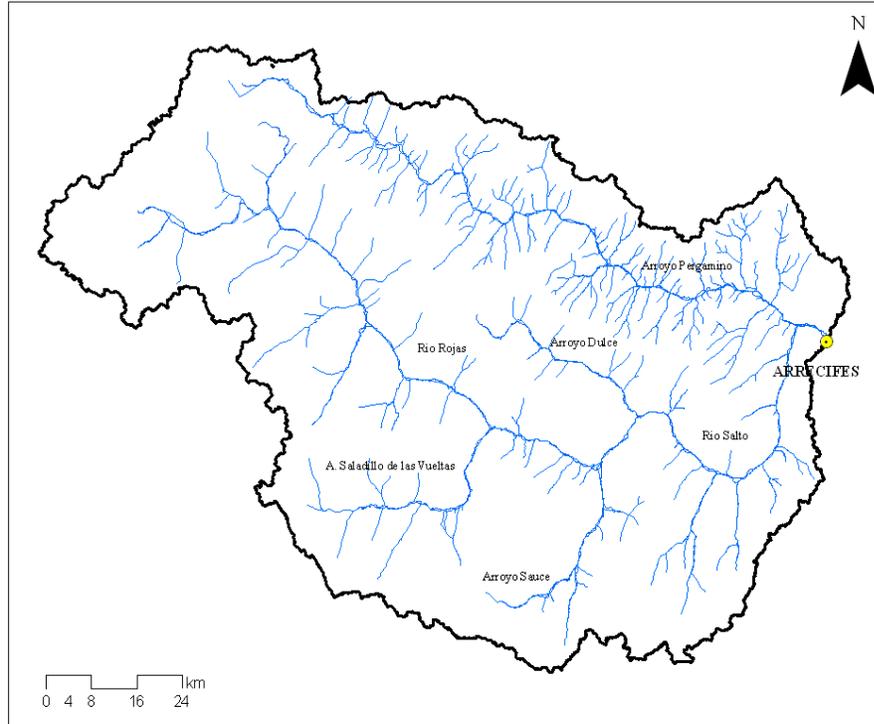


Figura 3. 6. Red de drenaje del área de estudio en la que se incluyen cursos primarios y secundarios.

El número de orden del cauce principal se determinó según Horton (1945), teniendo en cuenta los cursos intermitentes y permanentes, obteniendo como resultado un orden 5. La densidad de drenaje determinada con el orden 5 es de  $0,21 \text{ km/km}^2$ , siendo éste un valor bajo que se asocia a regiones pobremente drenadas, con relieves de escasa pendiente y suelos permeables. El patrón de alineamiento del cauce principal es recto ( $P_a: 1,29$ ); el cual, sin embargo, está conformado por un curso que presenta sinuosidad. Asimismo, se observa que la cuenca posee un patrón de drenaje del tipo dendrítico, formado por un curso principal (Río Arrecifes) con dos afluentes principales y cursos cortos e irregulares que se van uniendo a los anteriores siguiendo diferentes direcciones. Por tanto, se puede concluir que el área se encuentra en una zona de pendientes planas y relativamente uniforme en su litología.

## Capítulo 3

### 3.4 Uso de suelo

A principios del siglo XX, la vegetación natural de la cuenca se caracterizaba por presentar un mosaico de formaciones herbáceas dominantes en las porciones elevadas de las lomadas, que alternaban con bosques en galería en las márgenes de los cursos de agua (Cabrera, 1971). Esta cobertura original, se modificó casi por completo debido a la expansión de la frontera agrícola en la pampa húmeda producida desde 1880 hasta finales de 1930. La riqueza y potencialidad productiva de la cuenca la convirtieron en un área con fuertes ventajas para la producción agropecuaria (Manuel-Navarrete *et al.*, 2005). A partir de los años 90 hubo un nuevo cambio en el uso del suelo, producto de las innovaciones tecnológicas e impulso económico, en el que gran parte de las extensiones tradicionalmente ganaderas y de cultivos forrajeros fueron desplazadas por la soja.

Actualmente, la Red de Información Agropecuaria Nacional (RIAN) ubica al Arrecifes dentro de la zona VI-J, la cual se corresponde con el “núcleo agrícola” del norte de la provincia de Buenos Aires, siendo los principales cultivos la producción de oleaginosas (soja y girasol) y cereales (maíz y trigo) (RIAN, 2012). La actividad ganadera se desarrolla sólo en las áreas aledañas a afluentes de agua y cañadas con suelos de alcalinidad sódica y drenaje deficiente; y en posiciones topográficamente altas, en las que el suelo presenta cierta acidez en los horizontes superficiales (Gaspari *et al.*, 2006). En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestra la evolución durante los últimos 40 años de la superficie sembrada de los principales cultivos invernales y estivales (Sistema Integrado de Información Agropecuarias [SIIA], 2012).

Al considerar los cultivos invernales se observa que la mayor superficie corresponde al trigo (Figura 3.7). Si se compara el área sembrada de la década de los ochenta con otros periodos se observa una disminución de la superficie sembrada en invierno del 20 % en los noventa y del 51 % en la última década. Respecto a los cultivos estivales, y en lo que a los años 80 se refiere, se puede concluir que hubo un incremento en

### Capítulo 3

la superficie sembrada de un 20 % en la década de los noventa y de hasta un 40 % en los últimos años. Asimismo, se ha constatado una importante reducción en el área maicera en beneficio al área sojera (Figura 3.8).

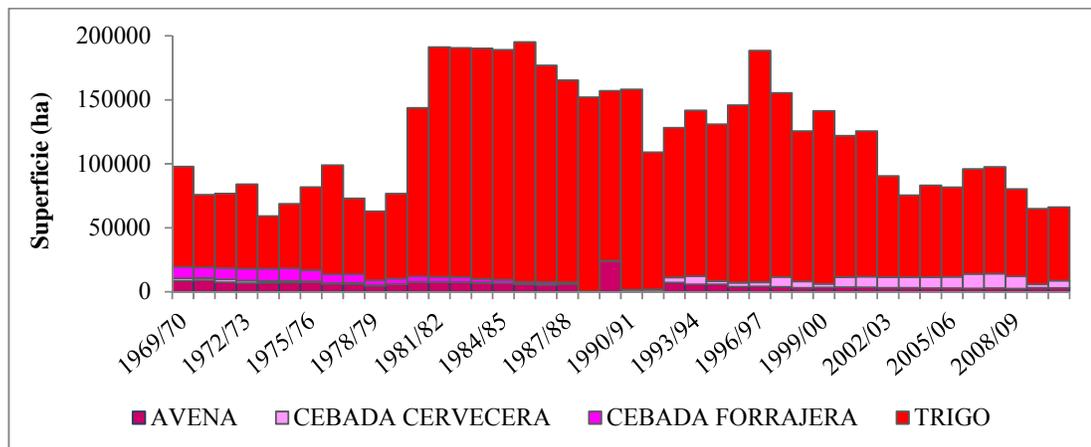


Figura 3. 7. Evolución de la superficie de área sembrada en primavera para la serie 1969/70-2010/11. Elaboración propia en base a datos de SIIA (2012).

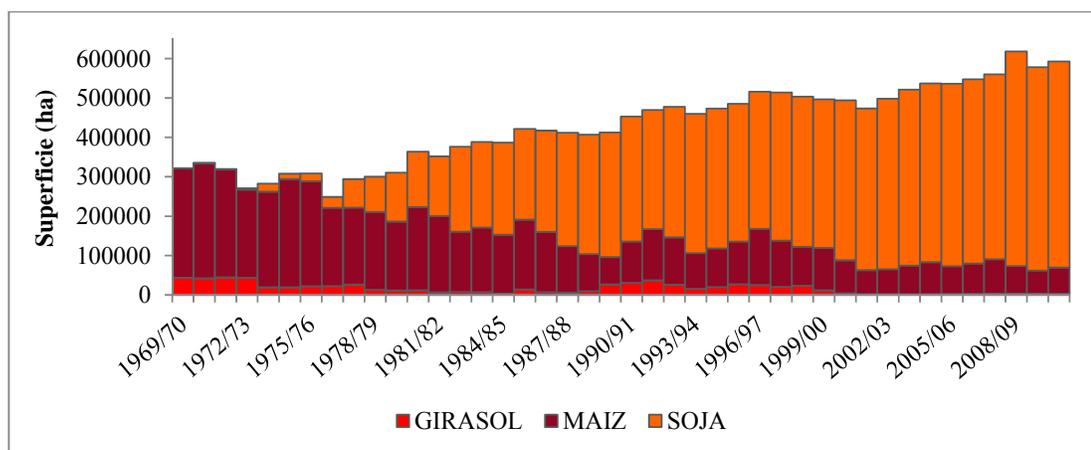


Figura 3. 8. Evolución de la superficie de área sembrada en verano para la serie 1969/70-2010/11. Elaboración propia en base a datos de SIIA (2012).

### 3.5 Suelos

El área de estudio posee suelos de gran profundidad, bien desarrollados, con perfiles definidos y con buena aptitud agrícola. En general, las texturas son franco-limosas y son no alcalinos y no salinos. Dichos suelos se han desarrollado sobre materiales loésicos donde la granulometría del limo varía según el área de depositación, siendo más grueso en

## Capítulo 3

la parte central de la cuenca donde dominan suelos de mejores características físicas INTA (2009). En general, presentan una susceptibilidad manifiesta a la erosión hídrica moderada, originándose cárcavas y zanjas en los sectores más débiles. El manejo inadecuado del suelo, realizado históricamente en las diferentes actividades agropecuarias, ha causado el truncamiento de los perfiles superficiales en numerosas áreas, limitándose su capacidad de uso original. Si bien la erosión hídrica es un proceso de importancia en las áreas de mayor pendiente, los procesos de degradación de la estructura y de la fertilidad se manifiestan en forma generalizada (Michelena *et al.*, 1988).

El orden predominante de toda la cuenca lo ocupa el Molisol (89 %). Este orden se caracteriza por poseer suelos oscuros, con un horizonte superficial fértil y de alta carga orgánica, de estructura granular o migajosa moderada y fuerte, que facilita el movimiento del agua y el aire. Son suelos que pueden ser poco profundos a la vez que muy profundos, mientras que el drenaje interno es de muy pobre a bien drenado. Se le considera como uno de los órdenes más productivos desde un punto de vista agrícola. El segundo orden presente de importancia es el Alfisol (0,4 %), que comprende a aquellos suelos de origen fluvio-eólicos, desarrollados en las áreas de influencia de bañados y arroyos. Los suelos derivados de este orden se caracterizan por ser de colores grises, poco profundos, con fuerte influencia de condiciones hidrohalomórficas, desde la superficie suelen ser alcalino sódicos, y habitualmente son suelos aptos para la actividad ganadera.

### **3.6 Hidroclimatología**

#### **3.6.1. Clima**

Según la clasificación de Koppen la cuenca presenta un clima subtropical húmedo. La descripción climática fue elaborada a partir de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del área de estudio (Pergamino NH145 y Junín NH453), cuyos datos fueron obtenidos de la base de datos del Instituto de Clima y Agua del INTA (SIGA-

## Capítulo 3

Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico). Así, la precipitación acumulada media anual es de 940,3 mm, mientras que las temperaturas medias oscilan entre 23 y 10 °C. En la Tabla 3.4 se muestran los valores medios mensuales y anuales de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y evapotranspiración potencial (ETP) según el método de Penman de la serie Pergamino NH145 (1957-2011).

Tabla 3. 4. Principales variables climáticas de la estación “Pergamino NH145” para el período 1957-2011. Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012).

<b>Mes</b>	<b>Precipit. (mm)</b>	<b>T° Max (°C)</b>	<b>T° Min (°C)</b>	<b>Humedad Relativa (%)</b>	<b>Velocidad del viento a 10 m (km/h)</b>	<b>ETP x Penman (mm)</b>
Enero	110,2	30,4	16,6	64,1	10,3	166,3
Febrero	109,8	28,8	15,8	69,4	9,5	126,6
Marzo	128,4	26,9	14,1	72,8	9,2	101,7
Abril	94,7	23,0	10,4	74,9	9,4	61,3
Mayo	48,6	19,6	7,5	77,3	9,9	39,3
Junio	32,9	15,7	4,7	79,4	10,8	26,3
Julio	31,3	15,6	4,4	78,6	11,6	31,5
Agosto	32,6	17,7	4,9	72,7	12,5	51,6
Septiembre	49,0	20,1	6,8	68,4	13,6	78,5
Octubre	115,0	22,9	10,2	69,5	13,3	108,9
Noviembre	90,8	26,2	12,9	65,5	12,4	138,5
Diciembre	96,9	29,1	15,3	62,4	11,3	162,1

La región de la pampa húmeda, tiene una climatología bastante homogénea. Se caracteriza por poseer inviernos secos siendo los meses más húmedos los comprendidos entre octubre y marzo. No obstante, como se muestra en el balance hídrico, el déficit de agua de mayor importancia se produce durante finales de primavera y principios del verano, como resultado de la mayor evapotranspiración en esta época del año (Figura 3.9). Así, el alto grado de evapotranspiración debido a condiciones de elevadas temperaturas y radiación solar, influye considerablemente reduciendo la aportación anual.

## Capítulo 3

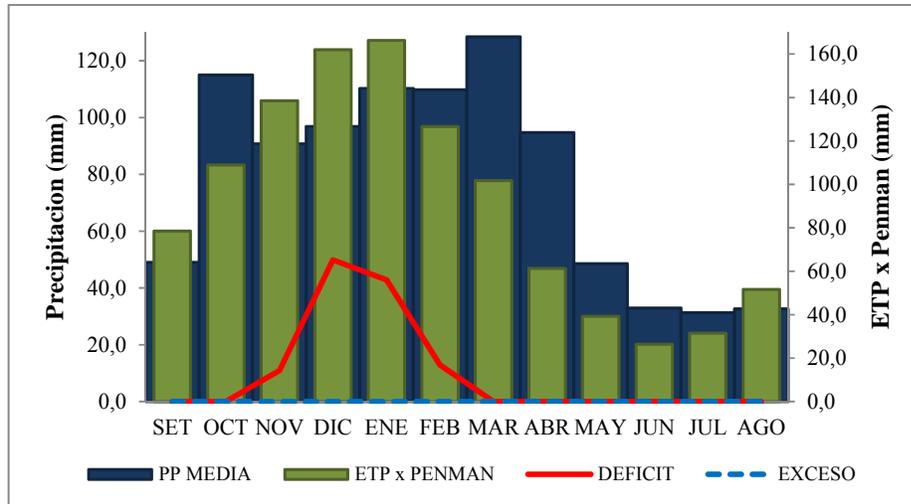


Figura 3. 9. Balance hídrico para la estación “Pergamino NH145” considerando el año hidrológico (1957-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012).

### 3.6.2. Hidrometría

La estadística hidrológica mensual y anual del río Arrecifes se obtuvo a partir de los caudales medios diarios del río Arrecifes de la estación “río Arrecifes” N° HL 4035, la cual se encuentra ubicada en el balneario de la ciudad con igual nombre. Los datos de alturas diarias y aforos (con una periodicidad aproximada bimestral) fueron registrados por el ADA durante el periodo 1963-2002. La serie no es completa y presenta algunos años con pocos datos o incluso sin registro. A partir de las alturas diarias y aforos, Flamenco (2012) ajustó una curva de descarga con un coeficiente de correlación  $r=0,96$  y un error global e.c.m.=  $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$  (para valores entre  $1,3$  y  $576 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

El régimen hidrológico del río Arrecifes, se caracteriza por presentar picos primaverales y otoñales coincidentes con la época de mayor lluvia (septiembre-mayo). Los caudales máximos, de la serie Arrecifes N° HL 4035, se dan en primavera siendo el valor máximo absoluto de  $460 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sin embargo, debido a las características hidráulicas e hidrológicas de la cuenca ante eventos de precipitación extrema, se producen crecidas importantes y violentas en ella, particularmente en las áreas aledañas a los afluentes. Los caudales mínimos se producen durante fin del invierno y el mes de enero (que concuerda con el mes de mayor déficit).

## Capítulo 3

Se trata de un río poco caudaloso con un caudal módulo de  $21 \text{ m}^3/\text{s}$ . La aportación anual media es de unos  $579 \text{ Hm}^3$ , con un coeficiente de variación de  $53 \text{ Hm}^3$ . En la Figura 3.10 se resumen los valores medios anuales de la estación “N° HL 4035” (1963-2002) adoptando como inicio del año hidrológico el mes de septiembre. En relación a los caudales extremos, entre las crecidas más destacadas se pueden citar las correspondientes al 10 de octubre de 1967 ( $460 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 15 de noviembre de 1985 ( $435 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el 6 de mayo de 1993 ( $450 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el 30 de diciembre de 2002 ( $423 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Si bien, en general, el río se caracteriza por poseer caudales bajos, presenta crecidas cíclicas importantes que pueden superar fácilmente los  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  y ocasionar importantes inundaciones en las áreas más vulnerables de la cuenca.

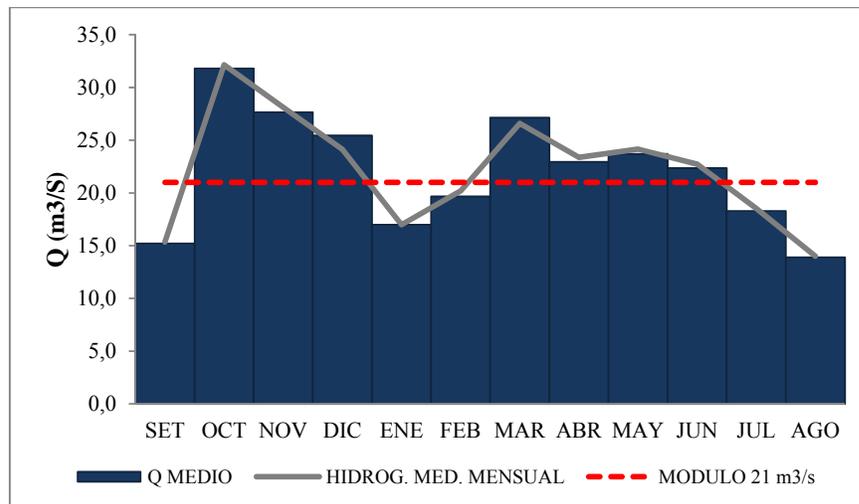


Figura 3. 10. Hidrograma medio anual en base a datos de la estación “N° HL 4035” (1963-2002) y Flamenco (2012).

## Capítulo 4

**Capítulo 4 : Metodología****4.1. Sinopsis de los fundamentos teóricos del modelo SWAT**

SWAT permite simular los procesos físicos del ciclo hidrológico, a escala subdiaria, diaria, mensual o anual. Como datos de entrada requiere de información espacialmente distribuida de: suelo; uso del suelo y elevación del terreno. Además, necesita de datos climáticos (precipitación, temperatura, velocidad del viento, radiación solar). El modelo subdivide la cuenca en subcuencas a partir de la topografía. Este modo de desagregación es muy útil, especialmente cuando hay variabilidad espacial en relación a los factores que determinan la transformación de la lluvia en escorrentía (usos del suelo, tipologías de suelo edáfico, topografía).

Asimismo, SWAT subdivide las subcuencas en unidades de respuesta hidrológica (HRU, *Hydrologic Response Units*). Las HRUs se obtienen integrando la información de: tipo de suelo, uso del suelo y pendiente, correspondiendo a las únicas combinaciones posibles entre estos factores. Su finalidad es mejorar la precisión de los cálculos asociados a la simulación hidrológica, así como proporcionar una mejor descripción física de los procesos implicados (Neitsch *et al.*, 2011). En cada HRU se representa el balance del agua mediante 4 volúmenes de almacenamiento: i) nieve; ii) perfil de suelo (0-2 m); iii) acuífero superficial (2-20 m) y iv) acuíferos profundos (> 20 m). A este respecto, la simulación se realiza en dos fases:

1. La Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico: controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de nutrientes y de pesticidas (cuando la finalidad es evaluar la calidad de las aguas) que van hacia el canal principal en cada subcuenca (Figura 4.1). Esta fase se modela utilizando la Ecuación 4.1. de balance de agua (Neitsch *et al.*, 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (4.1.)$$

## Capítulo 4

Donde:  $SW_t$  es el contenido de agua en el suelo en el día  $t$ ;  $SW_0$  es el contenido inicial del agua en el día  $i$  (mm);  $t$  es el tiempo (días);  $R_{day}$  es la precipitación diaria (mm);  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía diaria (mm);  $E_a$  es la evapotranspiración diaria (mm);  $W_{seep}$  es la percolación diaria (mm) y  $Q_{gw}$  es el flujo de base.

2. La Fase de Propagación de la Escorrentía: caracteriza el movimiento del agua y sedimentos a través de la red de drenaje y hasta el desagüe.

En esta Tesis se optó por la aplicación de SWAT en su interfaz ArcSWAT versión 2009.93.6 (Neitsch *et al.*, 2011), que se incorpora como una extensión al *software* ArcGIS y que puede descargarse desde el enlace <http://swat.tamu.edu/software/>. Entre sus ventajas cabe destacar: la integración de los *inputs* del modelo a los SIG; el nivel de detalle espacial que se puede alcanzar; la capacidad de simular distintos escenarios de crecimiento de cultivos y manejo de la tierra, así como su capacidad de simular largos periodos que permiten ver el impacto de diferentes procesos (p.e. sequías) sobre la cuenca (Narasimham, 2004).

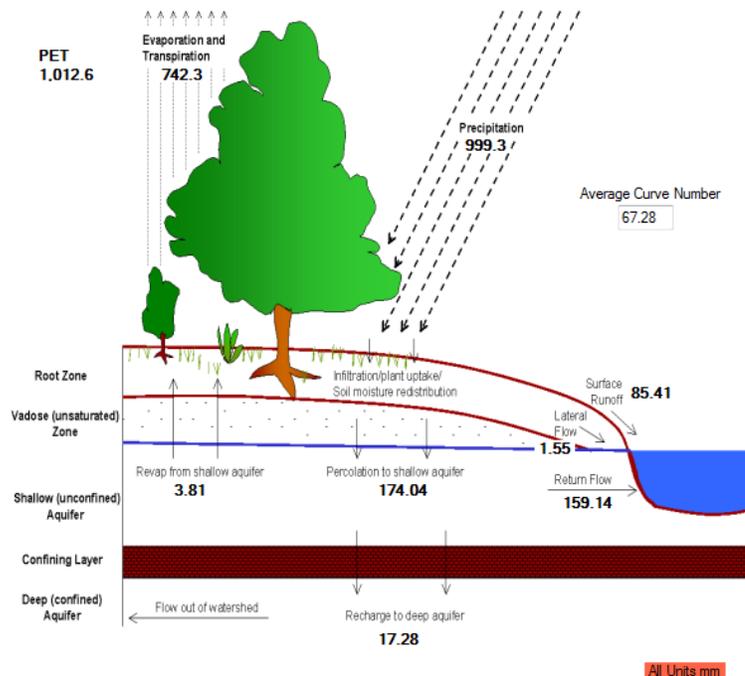


Figura 4. 1. Representación esquemática del balance de agua anual del modelo SWAT calibrado para la cuenca Arrecifes. Elaboración propia obtenida de la salida de la interface gráfica del programa SWAT.

## Capítulo 4

### **4.2. Datos de entrada al modelo SWAT para generar el modelo de cuenca**

#### **4.2.1. Datos hidrometeorológicos**

Las variables climáticas necesarias son precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. El modelo SWAT incorpora esta información mediante el ingreso de registros diarios, o bien a través de datos provenientes de un simulador climático.

##### **4.2.1.1. Datos meteorológicos diarios**

Los datos se obtuvieron a partir de información proveniente de estaciones meteorológicas. Para determinar el clima de cada subcuenca, el modelo utiliza un método de cálculo para determinar la menor distancia existente entre cada estación meteorológica y el centroide de cada subcuenca. De este modo, se incluyen únicamente las estaciones meteorológicas más próximas. Para ello, se tuvieron en cuenta las estaciones: i) INTA NH0145; ii) INTA NH0492; iii) Servicio Meteorológico Nacional (SMN) NH0453. La primera se ubica en la estación experimental de Pergamino (-33,93 Lat., -60,55 Long.), habiéndose considerado como periodo de estudio los años 1957-2011. La segunda se localiza en la ciudad de San Pedro (-33,68 Lat., -59,68 Long.) siendo el periodo considerado 1967-2011. Por último, la tercera se sitúa en la ciudad de Junín (-34,55 Lat., -61,81 Long.), habiéndose considerado el periodo 1959-2011. Además, se analizaron las series diarias de las estaciones de la Autoridad del Agua (ADA): Arrecifes, Colón, Salto y Rojas y de las cooperativas agrícolas de la zona, que finalmente no fueron incorporadas por no cumplir con requisitos mínimos de calidad. Toda la información histórica fue extraída de la base de datos del Instituto de Clima y Agua.

Las series fueron sometidas a un control de calidad para corroborar la consistencia de los datos, en base a la detección de valores no válidos y ausentes. Para ello, se realizó un análisis gráfico de los datos cuya finalidad fue la detección de alteraciones y valores

## Capítulo 4

atípicos (*outliers*). Se identificaron como *outliers* a aquellos valores que superan 4 desvíos estándar de la media para la precipitación y 5 desvíos estándar para la diferencia de temperaturas de dos días consecutivos (Nauman, 2009). Estos valores se chequearon con los valores provenientes de otras estaciones cercanas. A este respecto, aquellos datos que no lograron ser verificados se consideraron erróneos y fueron eliminados de la serie. Todos los datos ausentes se reemplazaron con el valor -99,0. De manera preliminar, la consistencia de las series se determinó tomando como criterio la estacionariedad e independencia de los datos. Asimismo, se tuvieron en cuenta estadísticos descriptivos como la media y la desviación típica, los cuales permitieron detectar saltos o cambios de tendencia en las series. El análisis descriptivo fue complementado con un test estadístico en el que la hipótesis nula  $H_0$  fue: que la serie no presentaba tendencias ni tampoco diferencias entre las posibles submuestras. Seguidamente, se comprobó la tendencia de las series con el test de Mann-Kendall, evaluándose posteriormente su continuidad con el Test de Smirnov.

Finalmente, cada variable se adecuó a las unidades de medida y formatos requeridos por SWAT (Tabla 4.1). En el Anexo 1 se muestra un ejemplo del formato requerido por SWAT para cada variable.

Tabla 4. 1. Variables climáticas en las unidades especificadas por SWAT.

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>
Precipitación	mm
Temperatura min/máx.	° C
Velocidad de Viento	m/s
Humedad relativa	expresada en fracción
Radiación Solar	MJ/m <sup>2</sup> /día

### 4.2.1.2. Simulador de Clima

Los valores diarios para el clima pueden ser generados con un simulador climático, que deriva las series de datos estadísticos que representan el clima. Así, este simulador tiene la capacidad de obtener un conjunto de datos diarios para cada subcuenca. Los

## Capítulo 4

valores para cualquiera de ellas son elaborados independientemente y no tienen correlación espacial entre sí. Además, el simulador se puede utilizar para generar los registros ausentes de las diferentes variables. SWAT incorpora una base de datos climática para Estados Unidos, la cual contiene los datos de 1041 estaciones a lo largo del país, así como un simulador climático. A este respecto, cuando el ámbito de estudio se encuentra fuera de Estados Unidos se puede optar bien por seleccionar estaciones con un patrón climático similar al de la zona que se quiere estudiar, o por crear un simulador climático propio.

Para esta tesis se decidió generar un simulador propio al objeto de poder reemplazar los datos faltantes (-99,0) por valores representativos de la serie. El simulador se construyó a partir de los datos diarios de las estaciones NH0145, NH0453 y NH0492, mediante el software diseñado por Gabrielle Boisramé “WGNmaker4.xlsm”. Este programa es de dominio público y fue descargado del sitio <http://swat.tamu.edu/software/>. Se trata de una macro de Excel diseñada exclusivamente para calcular todas las estadísticas del simulador. La aplicación requiere de un periodo de registros diarios no inferior a 20 años, así como de las variables presentadas en la Tabla 4.2. WGNmaker4 utiliza la misma metodología implementada en el programa WXPARM desarrollado por Williams (1992). En el Anexo 1, se muestran los parámetros y unidades requeridos por SWAT para cada variable climática ingresada al programa.

Tabla 4. 2. Variables climáticas requeridas por WGNmaker4 en las unidades especificadas.

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>
Precipitación	mm
Temperatura min/máx.	° C
Velocidad de Viento	m/s
Punto de Rocío	° C
Máxima lluvia en ½ hora	mm

## Capítulo 4

### 4.2.1.3. Información Hidrológica

Para la calibración y validación del modelo SWAT, se utilizó la serie de datos de caudales diarios del río Arrecifes correspondiente a la estación “río Arrecifes” N° HL 4035. Esta estación se encuentra ubicada en el balneario de la ciudad que lleva su mismo nombre. Los datos fueron registrados por el ADA durante el periodo 1963-2002 con una frecuencia diaria en lo que a las alturas se refiere, mientras que los aforos se estimaron con una periodicidad bimestral. La información fue digitalizada, al haberse cedido al Instituto de Clima y Agua en formato papel.

Con los datos de alturas y aforos se ajustó una curva de descarga con un  $r= 0,96$  y un error cuadrático medio e.c.m.=  $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$  para valores de caudales aforados entre  $1,3$  y  $576 \text{ m}^3/\text{s}$  (Flamenco, 2012). Con posterioridad, se calcularon los caudales diarios, cuya serie fue sometida a un control de calidad para corroborar la homogeneidad y consistencia de los datos. La serie resultó incompleta y presentó algunos años con pocos o incluso sin registros (Figura 4.2). Como resultado, en primer lugar se eliminaron aquellos años con gran cantidad de datos faltantes, luego se determinaron los *outliers* máximos y mínimos, los cuales se identificaron calculando el umbral superior ( $527 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) e inferior ( $1,1 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) de la serie de acuerdo mediante el método de análisis de frecuencias de extremos propuesto por Chow *et al.* (1994), considerando una distribución de frecuencia *Log Pearson III* y un periodo de retorno de 25 años.

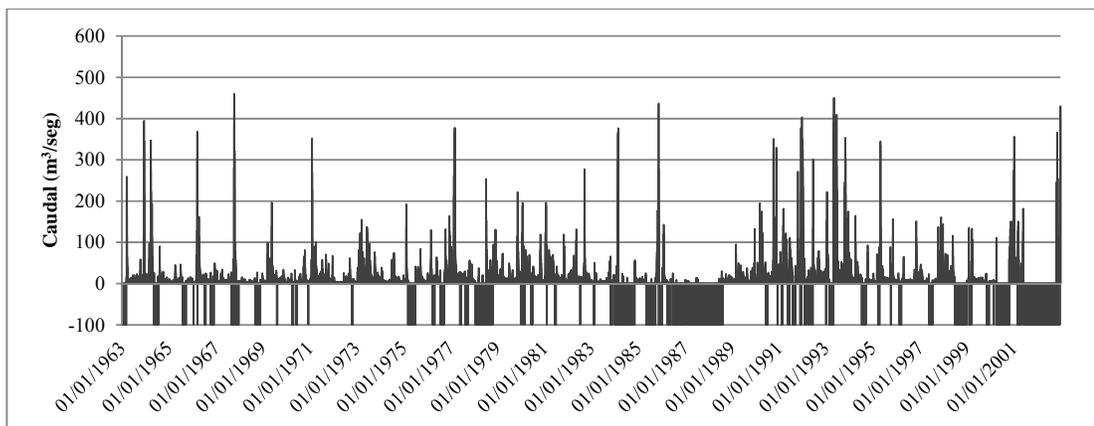


Figura 4. 2. Marcha diaria de la serie de caudal.

## Capítulo 4

En el Anexo 3, se muestra un ejemplo del formato requerido para los caudales por el software de calibración SWAT CUP.

### 4.2.2. Datos topográficos

Los modelos digitales de elevación (MDE) juegan un rol importante en la simulación de los procesos hidrológicos de la cuenca. Los atributos topográficos de la cuenca, incluyendo área, pendiente, exposición, longitud de pendiente, así como todos los atributos y características de los cursos de agua (longitud, ancho, profundidad, entre otros), fueron derivados y generados automáticamente por SWAT a partir del MDE.

#### 4.2.2.1. Procesamiento del MDE

La información topográfica utilizada se derivó del SRTM-C en su versión de 1 segundo de arco de resolución (aproximadamente 30 metros). El SRTM fue una Misión Topográfica de Radar volada en el Transbordador Espacial *Endeavour* entre 11-22 de febrero del 2000, en la que se utilizaron instrumentos de radar SIR-C (1 y 3" de arco) y X-SAR (1" de arco). Gracias a esta misión se logró producir el que hasta la fecha es el MDE más completo y de alta resolución existente para toda la tierra. Fue un proyecto corporativo en el que participaron varios países y que fue dirigido por la NASA. Con posterioridad los datos se han ido cediendo al resto del mundo (Farr *et al.*, 2007). El requisito respecto al error global de la misión fue menor a 20 metros en horizontal y a 16 metros en vertical. En un estudio realizado por Lencinas y Díaz (2011) en el que se evaluó la precisión planimétrica de los MDE SRTM-C, SRTM-X y Aster GDEM (30 m), se concluyó que el error medio cuadrático (en altura y en el plano) fue más bajo para los datos SRTM-X. Sin embargo, debido a que los datos SRTM-X no se encuentran disponibles gratuitamente, se consideró que el SRTM 1-C era la mejor opción, en términos de resolución y precisión, para representar la topografía de la cuenca del Arrecifes.

## Capítulo 4

No obstante, los datos SRTM no pueden ser utilizados directamente para aplicaciones hidrológicas. Ello es debido a que la señal de la banda C es especialmente sensible a la geometría y orientación de las hojas de la vegetación. Por tanto, en estos casos, la energía es fuertemente dispersada y no puede penetrar la vegetación de manera que el MDE generado no muestra la altura del suelo desnudo sino la altura de la superficie visible, produciendo una fuente importante de ruido. En la región pampeana este problema se puede observar muy bien, quedando caracterizado por un mosaico continuo de cultivos y pastizales (de alturas bajas) interrumpidos por pequeños bosquetes o montes de eucalipto, algarrobos o caldenes (de portes altos) (Figura 4.3 a y b). Esta distorsión interfiere en el cálculo de la dirección del flujo real y cantidad de agua en cada celda, afectando como resultado a la calidad del modelo de cuenca.

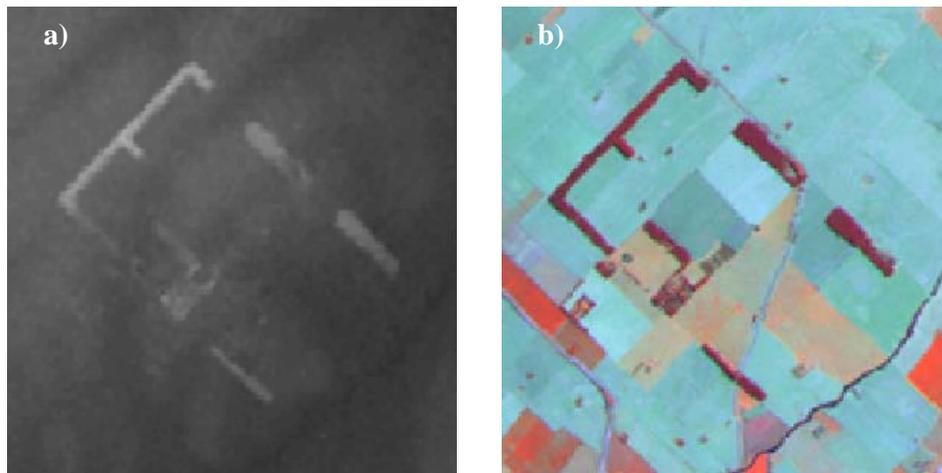


Figura 4. 3. a) Datos SRTM-C, los tonos más blancos corresponden a superficie elevada debida a montes. b) Los tonos rojos oscuro corresponden a montes de eucalipto visualizados en una imagen Landsat 5 TM en composición de falso color (R: 4 V: 5 A: 3).

Para poder utilizar los datos SRTM-C, primero se tuvo que eliminar el ruido ocasionado por la vegetación arbórea y arbustiva. Para ello, se identificaron automáticamente los píxeles o grupos de píxeles inconexos y se eliminaron del raster (Figura 4.4 a y b). Luego, se rellenaron los espacios vacíos utilizando una técnica de interpolación denominada *multisurface* (Wang, 1990). Esta metodología, usa una

## Capítulo 4

superficie que se determina a partir de la suma de las superficies vecinas ponderadas por la distancia al pixel (Figura 4.5 a y b). Finalmente, para homogeneizar la superficie del DEM, se aplicó un filtro de mediana, con una ventana de 3x3 píxeles. De este modo, se reemplazó el valor central de la ventana por la mediana de todos los píxeles considerados.

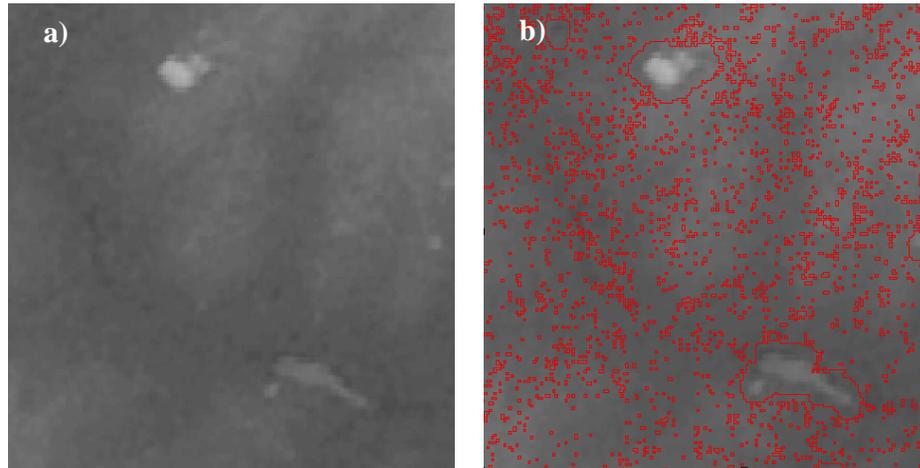


Figura 4. 4. a) Datos SRTM-C originales. b) Identificación y delimitación de ruidos.

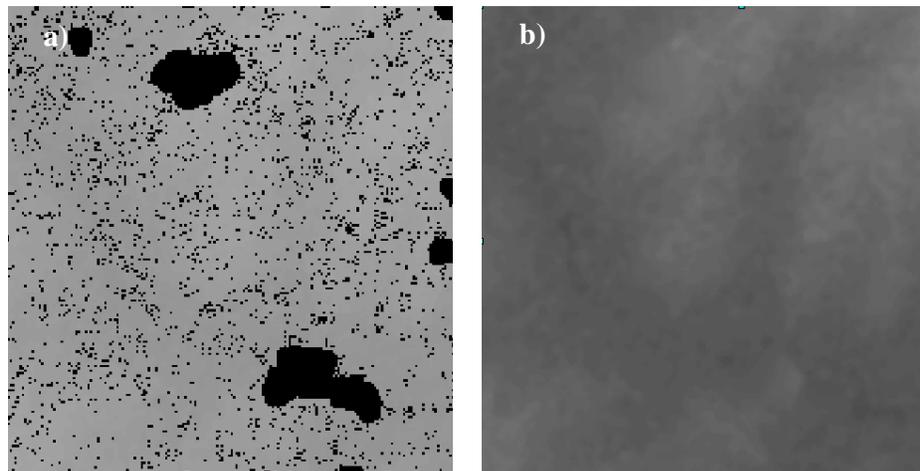


Figura 4. 5. a) Extracción de los polígonos que fueron establecidos como ruido. b) DEM final luego de rellenar los datos faltantes mediante técnicas de interpolación.

### 4.2.3. Datos de uso del suelo

El modelo SWAT incluye una versión simplificada del *modelo Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC) para tener en cuenta, durante la modelación, la variación del crecimiento de los cultivos y las prácticas de manejo sobre los mismos. EPIC

## Capítulo 4

simula el crecimiento de las plantas, diferenciando para ello entre plantas anuales y perennes. En las plantas anuales, considera su crecimiento desde la fecha de plantación hasta la cosecha, o bien hasta que las unidades de calor igualan las unidades potenciales de calor para la planta. Para las plantas perennes mantiene su actividad a través del año y durante toda la etapa de uso del modelo, a excepción del periodo invernal. El modelo de crecimiento fenológico de la planta, es utilizado por SWAT para estimar la eliminación de agua y nutrientes de la zona de raíz, así como la transpiración y la producción de biomasa. Asimismo, permite definir las prácticas de manejo de tal modo que el usuario puede especificar: i) el comienzo y finalización de la época de cultivo; ii) las rotaciones de los cultivos; iii) las rutinas básicas de gestión; iv) las cantidades aplicadas de agroquímicos; y vi) la incorporación de operaciones automatizadas.

### 4.2.3.1. Generación de la cobertura de uso del suelo

Las coberturas del uso de suelo utilizadas fueron elaboradas a partir de imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM. Para cubrir la totalidad del área de estudio, se utilizaron las escenas con *path-row*: 226-083/084, 227-083/084. Asimismo, para representar la variación estacional de los dos periodos agrícolas más característicos (cultivos invernales – estivales), se adquirieron diferentes fechas comprendidas entre septiembre 2006 – marzo 2007. Las imágenes, previamente a ser utilizadas, se procesaron y corrigieron geométricamente, utilizando como base las imágenes Landsat 7 ETM + del catálogo del *Global Land Cover Facility* (GLCF) de la Universidad de Maryland, debido a que esta fuente de dato presenta una precisión planimétrica entre 20 y 50 m (Tucker *et al.*, 2004). Además, se utilizó el modelo digital de elevación SRTM, de 90 m de resolución, provisto por el *Consultative Group on International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI). La utilización de un MDE en el proceso mejora la geometría de la imagen, ubicando cada píxel de la imagen en su posición geográfica real. En la Tabla 4.4 se muestra en detalle los datos satelitales utilizados.

## Capítulo 4

Tabla 4. 3. Datos satelitales utilizados.

Sensor	Path/row	Fecha de captura	Nivel de pre-procesamiento	Origen
Landsat 7 ETM+	226-084 226-083 227-084 227-083	09-12-1999 28-11-2001 16-12-1999 22-04-2000	L1G	EarthSat (NASA Landsat Program, 2003)
Landsat 5 TM	226-084/83 226-084/83 227-084/83 227-083/83	15-09-2006 21-01-2007 24-10-2006 27-12-2006	Nivel 5	Archivo Clima y Agua
SRTM	19-24/25 20-24/25	Febrero - 2000	Versión 4	CGIAR-CSI (Jarvis, 2008)

La cobertura de uso del suelo se elaboró mediante la combinación de los métodos de clasificación supervisada e interpretación visual. La clasificación se efectuó aplicando un método de segmentación, el cual divide la imagen en objetos primarios con iguales características espectrales, texturales, de forma y de contexto, y que posteriormente forma una nueva imagen (denominada imagen base) que será la clasificada (Figura 4.6 a y b). A continuación, se definieron visualmente áreas de entrenamiento, incluyendo un número suficiente y representativo para cada clase, realizándose la clasificación supervisada con el algoritmo *K Nearest Neighbor*. Por último, los resultados se exportaron a formato vector *shapefile* de ArcGis, para de este modo representar las clases obtenidas como polígonos.

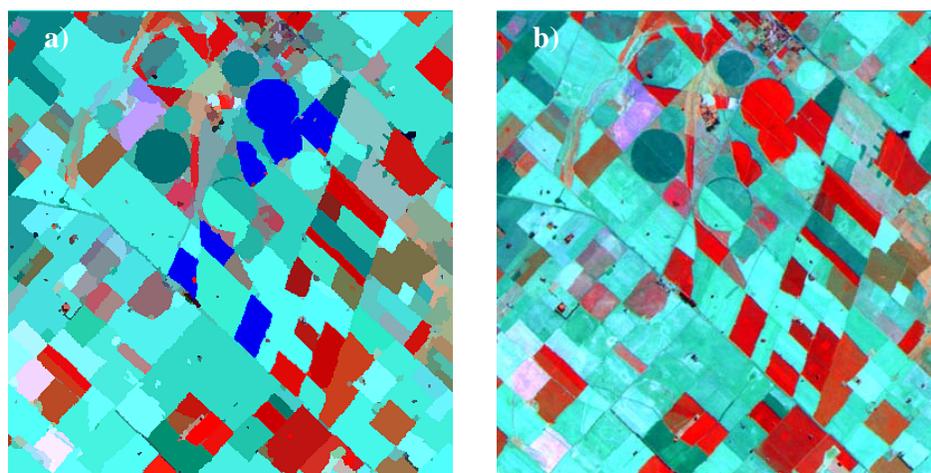


Figura 4. 6. a) Imagen base, en azul se muestran áreas de entrenamiento representativas para la clase trigo, b) Imagen Landsat 5 TM+ en composición de falso color (R:4 V:5 A:3).

## Capítulo 4

La interpretación visual se empleó para re-etiquetar los polígonos mal clasificados. Esta tarea requiere del conocimiento del terreno, experiencia del intérprete y facultad para caracterizar el comportamiento espectral de cada elemento a identificar. Para ello, se realizó un análisis multitemporal empleando las bandas 3, 4 y 5, que se corresponden con las longitudes de onda del rojo, infrarrojo cercano y medio del espectro electromagnético. En monitor se utilizó una composición falso color R: 4 V: 5 A: 3. A este respecto, numerosos investigadores tales como Haack y Jampoler (1995) o Horler y Ahern (1986), han determinado que esta composición es la más apropiada para diferenciar especies vegetales, estados fenológicos y de vigor/salud de la vegetación. La escala de trabajo visual utilizada fue 1:50.000. Además, se incluyó información de campo (puntos de localización de cultivos de las fechas estudiadas) para corroborar el grado de certidumbre de la clasificación realizada. A continuación se muestran las diferentes clases de usos del suelo diferenciadas a partir de las imágenes Landsat:

- **Cultivos:** zonas donde se practican actividades agrícolas entre las que cabe destacar: trigo, soja, maíz, girasol (Figura 4.7 a, b, c, d).
- **Recursos forrajeros:** zonas ocupadas por mezcla de pasturas naturales (Rec. Forrajero<sup>1</sup>) y/o cultivos utilizados para forraje “verdeos” como avena, centeno y cebada (Rec. Forrajero<sup>2</sup>) (Figura 4.7 e).
- **Suelo desnudo:** áreas de barbecho por cultivo convencional o siembra directa (Figura 4.7 f).
- **Áreas urbanas:** áreas tales como ciudades y aeropuertos (Figura 4.7 g).
- **Agua:** zonas ocupadas por lagunas permanentes y temporales, embalses y/o ríos (Figura 4.7 h).
- **Montes:** áreas en general cultivadas con especies arbóreas exóticas, o remanentes de bosque nativo, utilizadas principalmente como reparo del ganado. Las principales especies presentes son *Eucalyptus spp.* y *Prosopis spp.* (Figura 4.7 i).

## Capítulo 4

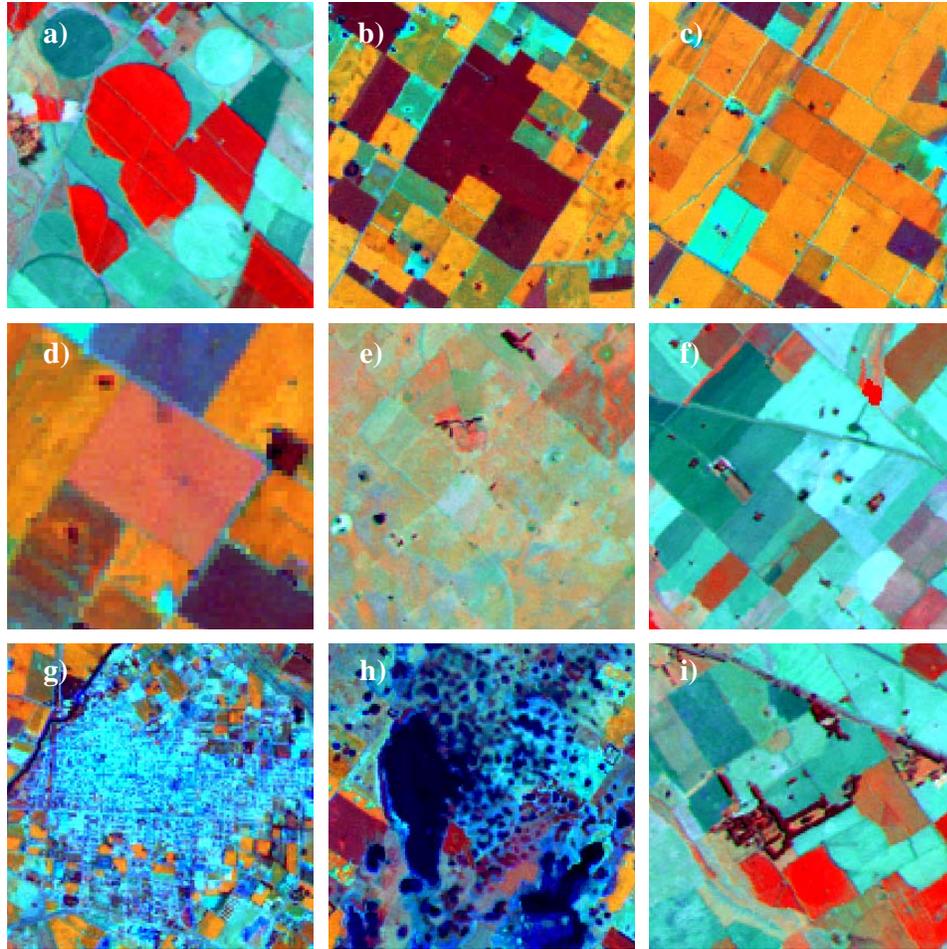


Figura 4. 7. Representación de cada clase sobre imagen Landsat 5 TM en composición falso color (R: 4 V: 5 A: 3). a) trigo, b) maíz, c) soja, d) girasol, e) recursos forrajeros, f) suelo desnudo, g) áreas urbanas, h) agua y i) montes.

Una vez finalizada esta etapa, se efectuó el post-proceso de la información vector. Para ello, se unieron todos los polígonos adyacentes con igual etiqueta. Seguidamente, se identificaron los polígonos con superficies menores a 1 ha, los cuales fueron agregados a los polígonos de mayor superficie. En la cartografía final se estableció como unidad mínima diferenciable una superficie de 1 ha, siendo la escala de 1:50.000.

#### 4.2.3.2. Procesamiento de la cobertura de uso del suelo para SWAT

Los datos de uso de suelo ingresados al modelo SWAT, se compusieron por los dos mapas finales (del periodo invernal y estival). Para ello, se efectuó una intersección entre ambas coberturas, resultando en un único mapa. Cada nuevo elemento se etiquetó con los

## Capítulo 4

atributos identificados en ambos periodos. A partir de este producto final, se determinó la distribución de los diferentes modelos de rotaciones de siembra para cada cultivo, propuestas en la sección 4.3.1 Manejo del suelo y rotaciones, para de este modo simular la evolución del uso del suelo a corto plazo. Además, se definió una tabla de uso de suelo denominada *Land Use Classification (LUC)*, la cual es requerida por SWAT para que el modelo pueda identificar las diferentes categorías de tipos de usos, de manera que puedan ser vinculados a la base de datos cobertura/crecimiento de plantas de SWAT. Esta base de datos se modificó, adaptándola a la vegetación existente en la cuenca. En el Anexo 1 se muestra un ejemplo de los formatos requeridos por SWAT para las tablas LUC, cobertura de uso de suelo (*.crop*, *.urban*).

### 4.2.4. Datos de suelos

El agua que ingresa al suelo puede moverse a través del perfil de diversas maneras. Así, puede ser removida por evapotranspiración, puede percolar al acuífero superficial si se supera la capacidad de campo, o moverse lateralmente hacia el curso de agua. A los efectos del modelo, la evapotranspiración es el proceso más importante de los anteriormente mencionados. SWAT puede simular estos procesos únicamente bajo condiciones de suelo saturado. Asume que cada horizonte tiene diferentes contenidos de agua, pero cada uno de ellos debe tener el agua uniformemente distribuida. Los datos requeridos por SWAT pueden dividirse en dos tipos: físicos y químicos. Las propiedades físicas del suelo gobiernan el movimiento del agua y aire a través del perfil y tienen un gran impacto sobre el ciclo del agua en cada HRU. De esta forma, SWAT interpreta estas cualidades para determinar, el punto de marchitez permanente, la capacidad de campo, volumen de agua drenable, etc. de cada suelo, y así el movimiento del agua dentro del perfil. Mientras que las propiedades químicas son usadas para establecer los niveles químicos iniciales del suelo y su requerimiento es opcional.

## Capítulo 4

### 4.2.4.1. Preparación de la cobertura de suelo

Los datos físicos y químicos de los suelos se extrajeron de las hojas 3360: 31 – 32 – 33 – 34 y 3560: 2 – 3 – 4 – 5 – 7 – 8 – 9 - 10 de las Cartas de suelos de la República Argentina – Provincia de Buenos Aires, escala 1:50:000 publicadas por INTA (2009). En esta cobertura, el esquema utilizado para clasificar taxonómicamente los suelos es el sistema americano conocido como *Soil Taxonomy*, que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, *Natural Resources Conservation Service*) (2006). El mismo, presenta un modelo de relaciones genéticas entre los suelos y está estructurado en un esquema jerárquico de 6 categorías. Esta cobertura llega hasta el nivel de serie, en el cual hay rangos de propiedades estrechas que se definen con bastante especificidad para un gran número de caracteres diferenciadores.

La cobertura fue adquirida en formato vector, a una escala 1:50.000, y para poder utilizarla se tuvo que realizar un reacondicionamiento de la misma. A este respecto, primero se aplicó topología poligonal con el fin de que cada polígono tuviera una identificación única y que se pudieran eliminar los elementos superpuestos, para de este modo realizar el cálculo de superficie. Seguidamente, se procedió a la georreferenciación utilizando las imágenes Landsat 7 ETM+ (Tabla 4.3) para que la cobertura se alinee lo mejor posible al SIG existente. Por último, cada polígono se vinculó a la información de las hojas de suelo. Para la designación de las Series se utilizan nombres locales, que pueden corresponder al sitio donde a ese suelo se lo identificó por primera vez o donde se encuentra mejor expresado.

### 4.2.4.2. Procesamiento de la cobertura de suelo para SWAT

Con el mapa final de suelos se creó una tabla de categorías denominada SoilC. Esta tabla es requerida por SWAT para que el modelo pueda identificar las diferentes categorías de tipos de suelos de la cobertura digital, y así vincularlos a la base de datos. El modelo sólo incluye datos de suelos de los Estados Unidos, lo que obligó a personalizar esta base

## Capítulo 4

de datos de acuerdo con el mapa de suelos disponible. La interface cuenta con cuatro opciones para elaborar la tabla de vinculación SoilC. En este caso se ha elegido la opción *Name*. En el Anexo 1, se muestra un ejemplo del formato requerido por SWAT para las tablas SoilC y (.sol).

### **4.3. Resto de datos de entrada al modelo**

#### **4.3.1. Manejo del suelo y rotaciones**

Las prácticas de manejo y rotaciones fueron especificadas para cada HRU (Tabla 4.4). Las rotaciones incluyen los cambios de manejo de un año a otro mediante el reemplazo de cultivos. Para esta Tesis, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: i) sólo se incluyó la práctica de cultivos en secano; ii) el crecimiento de las plantas se definió mediante épocas de siembra y cosecha; iii) se implementaron prácticas de labranza mínima con rastra de discos; y iv) se recrearon rotaciones de siembra clásicas de 3 años de duración.

El propósito de considerar las rotaciones, fue simular la evolución del uso del suelo mediante 3 escenarios de cobertura vegetal diferente y así mejorar el modelo. Para proyectar las rotaciones, se utilizaron las guías prácticas de los cultivos más importantes de la región norte de la provincia de Buenos Aires y sur de Santa Fe (INTA *et al.*, 1997 a, b, c, d). SWAT asigna las diferentes prácticas de manejo en cada HRU mediante una base de datos de manejo que consideran siembra, cosecha, riego, aplicación de agroquímicos y operaciones de labranza. En el Anexo 2, se muestra un ejemplo del formato requerido por SWAT para las tablas de manejo (.mgt1 y .mgt2).

## Capítulo 4

Tabla 4. 4. Prácticas agrícolas consideradas en el modelo SWAT. En la columna Rotación las letras indican tipos diferentes de rotaciones, y los números indican años consecutivos de la rotación. Elaboración propia con información derivada de las Guías prácticas de cultivos de Girasol, Maíz, Soja y, Trigo (INTA *et al.*, 1997 a, b, c, d).

Cultivo	Época de siembra	Época de cosecha	Rotación
Trigo	Temprana 1-jun a 25-jun Intermedia 25-jun a 20-jul Tardía 20-jul a 8-ago	Desde fines de octubre a mediados de diciembre	a) 1: Trigo-Recurso Forrajero2, 2: Recurso Forrajero2 (cont.)-Soja-Suelo en barbecho-Maíz, 3: Maíz (cont.)-Suelo en barbecho-Trigo b) 1: Trigo-Soja, 2: Soja (cont.)-Soja-Suelo en barbecho-Maíz, 3: Maíz (cont.)-Suelo en barbecho-Soja c) 1: Trigo-Maíz, 2: Maíz (cont.)- Suelo en barbecho-Soja, 3: Soja (cont.)-Suelo en barbecho-Soja
Maíz de Primera	20-ago a 15-oct	Desde mediados de febrero a mediados de abril	1: Maíz-Suelo en barbecho, 2: Maíz (cont.)-Suelo en barbecho-Trigo, 3: Soja-Recurso Forrajero2-Suelo en barbecho
Maíz de Segunda	15-dic a 15-ene	Desde fines de mayo a junio	
Soja de Primera	Optima 10-sep a 30-oct Tardía 1-nov a 10-dic	Desde marzo a principios de junio	a) 1: Soja, 2: Soja (cont.)-Recurso Forrajero2-Soja, 3: Soja (cont.)-Recurso Forrajero2-Suelo en barbecho b) 1: Recurso Forrajero2-Soja, 2: Soja (cont.)-Recurso Forrajero2-Soja, 3: Soja (cont.)-Recurso Forrajero2-Suelo en barbecho
Soja de Segunda	10-dic a 30-ene	Desde abril a principios de julio	c) 1: Suelo en barbecho-Soja, 2: Soja (cont.)-Recurso Forrajero2-Soja, 3: Soja (cont.)-Suelo en barbecho-Maíz d) 1: Soja, 2: Soja (cont.)-Suelo en barbecho-Maíz, 3: Maíz (cont.)-Trigo-Recurso Forrajero2
Girasol	20-sep a 30-oct	Desde principios de febrero a fines de marzo	1: Suelo en barbecho-Girasol, 2: Girasol (cont.)-Recurso Forrajero2-Suelo en barbecho-Maíz, 3: Maíz (cont.)-Suelo en barbecho
Recurso forrajero1			1, 2, 3: Recursos Forrajeros

## Capítulo 4

### 4.3.2. Datos de agua subterránea

SWAT subdivide esta componente en dos sistemas: el acuífero superficial (libre o no confinado), que contribuye a la red fluvial con el caudal de base; y el acuífero profundo (confinado) que no contribuye a la red fluvial y que elimina el agua del sistema. El agua entra al primer acuífero por infiltración/percolación, aunque es posible que esta misma agua se mueva hacia arriba por capilaridad. La recarga del segundo acuífero ocurre por percolación desde las áreas especificadas como de recarga, o bien desde el acuífero superior. La entrada de agua a ambos acuíferos se encuentra gobernada por las ecuaciones de balances de agua (4.2 y 4.3).

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg,sh} - Q_{wg} - W_{revap} - W_{pump,sh} \quad (4.2)$$

Donde:  $aq_{sh,i}$  es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial (*shallow*) del día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $aq_{sh,i-1}$  es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial del día  $i-1$  (mm H<sub>2</sub>O),  $W_{rchrg,sh}$  es la cantidad de recarga que ingresa al acuífero superficial el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{gw}$  es el flujo subterráneo o flujo base al canal principal el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $W_{revap}$  es la cantidad de agua en movimiento que ingresa a la zona no saturada en respuesta al déficit de agua el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O), y  $W_{pump}$  es la cantidad de agua removida por bombeo en el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O).

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + W_{deep} - W_{pump,dp} \quad (4.3)$$

Donde:  $aq_{dp,i}$  es la cantidad de agua almacenada en el acuífero profundo (*deep*) del día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $aq_{dp,i-1}$  es la cantidad de agua almacenada en el acuífero profundo del día  $i-1$  (mm H<sub>2</sub>O),  $W_{deep}$  es la cantidad de agua que ingresa por percolación desde el acuífero superficial el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O),  $Q_{gw}$  es el flujo subterráneo o flujo base al canal principal el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O), y  $W_{pump}$  es la cantidad de agua removida por bombeo en el día  $i$  (mm H<sub>2</sub>O).

La información requerida por SWAT respecto a las características hidrogeológicas del área de estudio, no se encontró disponible para este trabajo. Inicialmente, los diferentes datos requeridos se aproximaron a partir de publicaciones regionales, o bien generados en zonas cercanas. En relación con lo anterior, cabe destacar los estudios: Estudio de Aguas

## Capítulo 4

Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires (EASNE, 1972); Propiedades Edáficas y del Agua Subterránea. Riesgos de Salinización y Sodificación de los Suelos, en la Zona de Pergamino-Arrecifes (Losinno *et al.*, 2005). Seguidamente, los parámetros se ajustaron mediante la calibración del modelo. En el Anexo 2, se muestra un ejemplo del formato y variables requeridas por SWAT para las tablas de agua subterránea (.gw).

### 4.3.3. Datos de las características de los cursos de agua

SWAT asume que los cursos de agua tienen forma trapezoidal y que los lados del canal tienen una relación de la proyección horizontal a la vertical 2:1 con  $Z_{ch}=2$  (Figura 4.8). Para su caracterización, los usuarios deben definir el ancho ( $W$ ) y la profundidad del canal ( $depth$ ), así como la pendiente y coeficiente de Manning “ $n$ ”. Posteriormente, de estos datos se caracterizan los parámetros: ancho del fondo ( $W_{btm}$ ); perímetro; radio hidráulico y sección. Cuando el transporte de agua excede las dimensiones del canal, el agua inunda la llanura de inundación (Figura 4.9), las dimensiones del área de inundación son derivadas de las medidas ingresadas al canal. SWAT asume que los lados de la llanura de inundación tienen una relación 4:1 con  $Z_{ch}=4$ . Cuando el flujo llega a esta área la profundidad, perímetro y radio hidráulico se determina como la suma de las dos secciones.

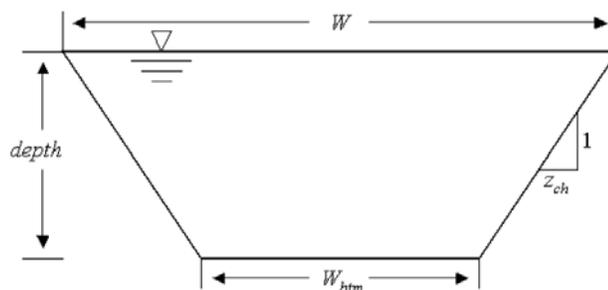


Figura 4. 8. Dimensiones del canal (Neitsch *et al.*, 2011).

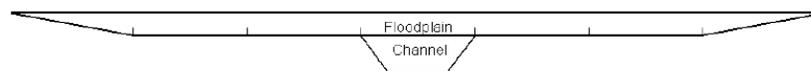


Figura 4. 9. Llanura de inundación del canal (Neitsch *et al.*, 2011).

## Capítulo 4

A partir del MDE, SWAT determina automáticamente estas dimensiones, aunque su precisión depende de la resolución del modelo. Al aplicar el SRTM de 30 metros de resolución espacial, la precisión de los parámetros geométricos del canal fue escasa. Como resultado, se optó por realizar una parametrización manual basada en información parcial de perfiles transversales aportados por el Instituto Nacional del Agua (INA); correspondientes a dos tramos de aproximadamente 5 km de longitud del arroyo Pergamino y río Salto. Como los cursos de agua del área de estudio tienen características morfológicas bastante homogéneas, el ancho del resto de los cursos de agua, se midió sobre las imágenes satelitales de alta resolución provistas por *Google Earth* disponibles en: <http://earth.google.com> (Figura 4.10). Respecto de la profundidad del canal se realizaron las siguientes consideraciones: i) las profundidades de los cauces principales se mantuvieron iguales para los cauces con mediciones (arroyo Pergamino y río Salto); y ii) en los cursos secundarios y demás afluentes se supuso una menor profundidad, suponiendo las siguientes profundidades: para anchos entre 20 y 10 metros se consideró profundidades de 4 a 3 metros, para anchos entre 10 y 5 metros se consideró profundidades de 3 a 2 metros, finalmente con anchos entre 5 y 1 metro se consideró profundidades de 2 a 1 metro.

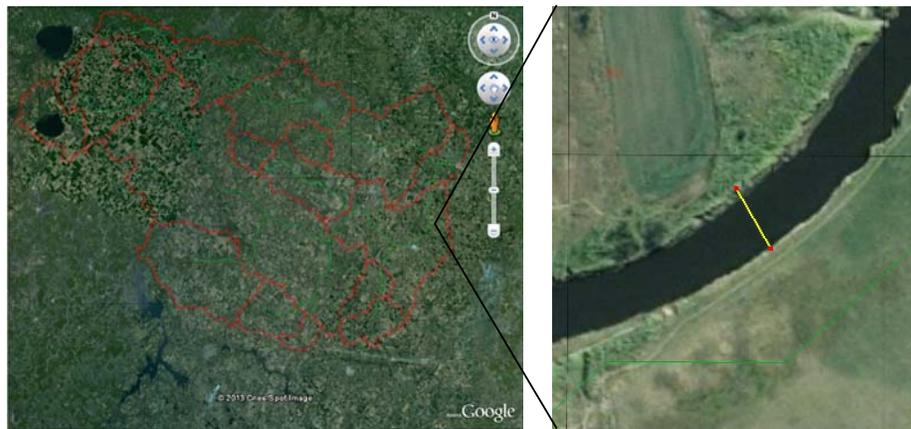


Figura 4. 10. Medición del ancho de los canales sobre imagen de alta resolución de Google Earth.

Capítulo 4

En el Anexo 2, se muestra un ejemplo del formato y variables requeridas por SWAT para las tablas de características físicas de los cursos de agua (.rte).

**4.4. Implementación del modelo SWAT para la estimación de humedad de suelo**

**4.4.1. Generación del modelo de cuenca**

**4.4.1.1. Discretización de la cuenca y delineación de las HRUs**

SWAT presenta tres modos distintos para discretizar la cuenca (grilla, pendientes representativas o subcuencas). En esta tesis se consideró la discretización por subcuenca, la cual tiene la ventaja de preservar los cauces y la trayectoria natural del flujo. En primer lugar, se definieron los cursos de agua, optándose por crearlos a partir del umbral de área mínimo establecido automáticamente por SWAT (550 ha), el cual permitió obtener una representación rigurosa de los cauces. Durante el proceso de delineación, se generaron grillas denominadas *flow direction and flow accumulation*, que dependen de la máxima pendiente, representando la dirección de escurrimiento y la acumulación de flujo, respectivamente; y a partir de las cuales se derivó la red de drenaje de la cuenca (Figura 4.11).

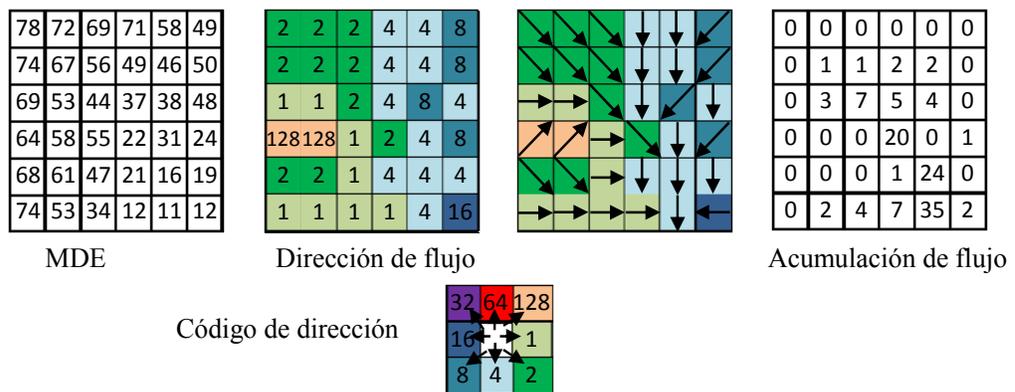


Figura 4. 11. Imágenes de dirección y acumulación de flujo a partir de un MDE (ESRI, 2013).

## Capítulo 4

La definición de las subcuencas, se realizó teniendo en cuenta criterios de homogeneidad en relación a los factores que condicionan la transformación de la lluvia en escorrentía. A este respecto, se prestó especial atención a las series de suelo, ya que en esta región es el factor más significativo. Esta aproximación obligó a realizar una delineación manual de las subcuencas, habiéndose desestimado por tanto el procedimiento de delineación automático, el cual se basa en el uso de las confluencias como puntos de control. De este modo, los puntos de desagüe se trasladaron manualmente al objeto de acomodarlos con los límites de las principales series de suelo (Figura 4.12). Finalmente, el cierre o salida de la cuenca se hizo coincidir con la estación “río Arrecifes” N° HL 4035, para de este modo utilizar las series de tiempo en ella registradas durante el proceso de calibración. Asimismo, durante el proceso de delineación también se obtuvieron los parámetros morfométricos de la red de drenaje y de las subcuencas.

Las unidades de respuesta hidrológicas (HRUs) se obtuvieron a partir de la integración del tipo de suelo dominante, uso de suelo y pendiente. Esta discretización permite reflejar con mayor precisión la variabilidad espacial del proceso de transformación de la lluvia en escorrentía (Neitsch, *et al.*; 2011), así como el ruteo del agua en cada HRU. De este modo se logra mejorar la exactitud en la simulación, en tanto y en cuanto quedan reflejadas las diferencias en los procesos hidrológicos en función de cuáles sean las combinaciones de coberturas. El modelo se puede simplificar de tal modo que una sola HRU describa una subcuenca, o bien complicar quedando caracterizada una subcuenca dada por múltiples HRUs. En esta tesis, se incluyeron múltiples HRUs, aunque su tamaño quedó condicionado por la elección de un umbral en porcentaje de área de las coberturas integradoras. Así, se consideró un área umbral del 2 % para el uso del suelo y 5 % en el tipo de suelo, habiéndose considerado una pendiente homogénea para el conjunto de la cuenca.

## Capítulo 4

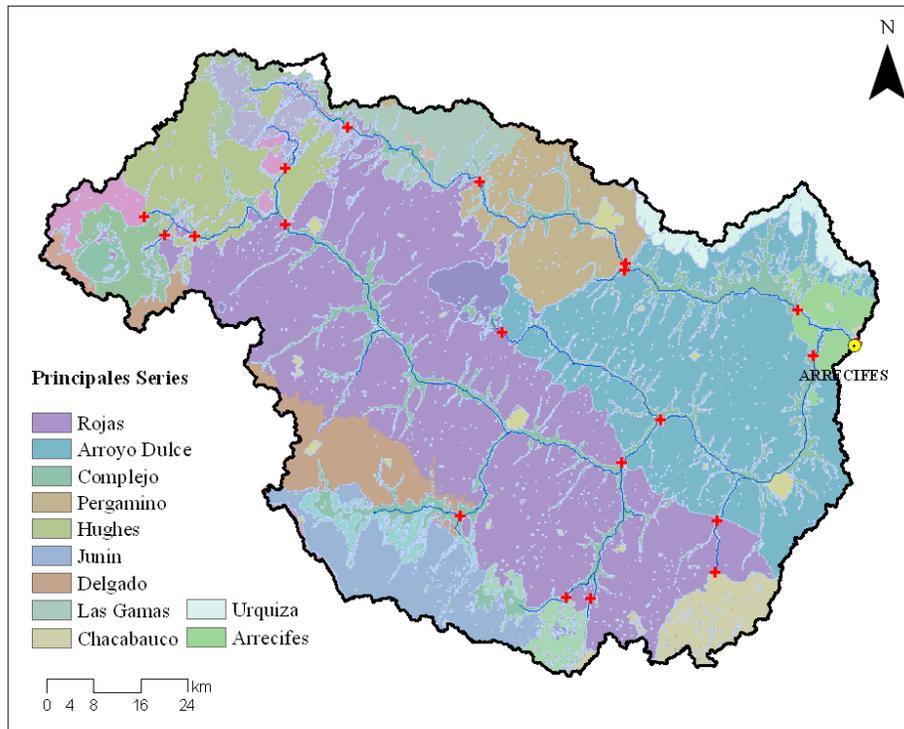


Figura 4. 12. Puntos de cierre para la definición de subcuencas a partir de las principales series de suelo.

#### 4.4.1.2. Métodos de cálculo

SWAT tienen diferentes posibilidades de cálculo para los principales procesos del ciclo hidrológico. En función de los datos disponibles y de la discretización de la cuenca se eligió la siguiente configuración:

1. Comienzo de la simulación: 1 de enero de 1975
2. Finalización de la simulación: 31 de diciembre de 1998
3. Simulación a paso diario y mensual.
4. Periodo de equilibrio de los parámetros: 5 años (1975-1979). Los resultados del periodo de equilibrio no se tuvieron en cuenta para la calibración y validación.
5. Método de estimación de la evapotranspiración potencial (PET).

La evaporación potencial, en función de cual sea la información disponible, se puede calcular según el método de Penman–Monteith (Monteith, 1965), Priestley–Taylor (Priestley and Taylor, 1972), o Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985).

## Capítulo 4

En esta tesis se aplicó el método de Priestley–Taylor (Ecuación 4.4), que requiere datos de: radiación solar; temperatura del aire y humedad relativa. Respecto a la estimación de la evapotranspiración real, SWAT primero determina la evaporación de la lluvia interceptada por el follaje de las plantas. Seguidamente, se utilizó la aproximación de Ritchie (1972) que calcula la máxima transpiración de las plantas y la máxima evaporación de suelos para un día dado.

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{net} - G) \quad (4.4)$$

Donde:  $\lambda$  es el flujo de calor latente (MJ /kg),  $E_0$  es el potencial de evapotranspiración (mm/día),  $\alpha_{pet}$  es un coeficiente,  $\Delta$  es la pendiente de la saturación de vapor en la curva presión-temperatura,  $de/dT$  (kPa/°C),  $H_{net}$  es la radiación neta (MJ/m2/día),  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ/m2/día),  $\gamma$  es la constante psicométrica (kPa/°C).

### 6. Método de cálculo de la escorrentía superficial y transformación lluvia-escorrentía.

La escorrentía superficial se estimó mediante la ecuación empírica (4.5) definida por el *Soil Conservation Service SCS* (1972). En ella, se establece que la escorrentía se produce cuando la tasa de agua sobre el suelo excede la tasa de infiltración ( $R_{day} > I_a$ ), permitiendo además el cálculo sobre diferentes tipos de usos de suelo y suelos:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (4.5)$$

Donde:  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía o exceso de lluvia (mm H<sub>2</sub>O),  $R_{day}$  es la profundidad de lluvia para el día (mm H<sub>2</sub>O),  $I_a$  son las abstracciones iniciales que se incluyen en el almacenamiento superficial definido como (0,2 S) y S es el parámetro de retención (mm H<sub>2</sub>O) definido mediante ( $S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$ ).

El cálculo diario de la curva número (CN) se realizó como función de la permeabilidad del suelo, uso del suelo y condiciones de humedad antecedentes. La CN diaria se calculó con el método de la evapotranspiración de las plantas, el cual

## Capítulo 4

utiliza esta variable como factor de peso en el coeficiente de retención del agua (Ecuación 4.6).

$$S = S_{prev} + E_o * \exp\left(\frac{-cncoef * S_{prev}}{S_{max}}\right) - R_{day} + Q_{surf} \quad (4.6)$$

Donde: S es el parámetro de retención para un día dado (mm),  $S_{prev}$  es el parámetro de retención del día previo (mm),  $E_o$  es la evapotranspiración potencial (mm/día),  $cncoef$  es el coeficiente de peso usado para calcular el coeficiente de retención diario de la CN dependiente de la evapotranspiración,  $S_{max}$  es el máximo valor que puede alcanzar el parámetro de retención un día dado (mm),  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía o exceso de lluvia (mm H<sub>2</sub>O),  $R_{day}$  es la profundidad de lluvia para el día (mm H<sub>2</sub>O).

SWAT realiza la transformación de las lluvias efectivas en escurrimiento directo mediante el método del hidrograma unitario triangular del SCS. El caudal instantáneo máximo ( $q_{peak}$ ) se calculó mediante el método racional utilizando la Ecuación (4.7). De este modo, el escurrimiento alcanza su pico cuando toda la cuenca está contribuyendo al flujo en la salida.

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} Q_{surf} Area}{3.6 t_c} \quad (4.7)$$

Donde:  $q_{peak}$  es la tasa de caudal pico de escorrentía (m<sup>3</sup>/s),  $\alpha_{tc}$  es la fracción de lluvia diaria caída en el tiempo de concentración. Área es el área de la subcuenca (km<sup>2</sup>) y 3.6 es un factor de conversión de unidades, y  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca en horas.

En grandes subcuencas con tiempos de concentración mayores a 1 día, sólo una porción de la escorrentía superficial llega al canal principal. A este respecto, SWAT incorpora un instrumento de almacenamiento de la escorrentía superficial para retrasar parte del agua de escorrentía que llega al canal principal. De este modo, el caudal en el curso principal será la suma del caudal generado en un día concreto, al cual habrá que sumarle el almacenado el día anterior. Ambos valores dependen de una expresión que representa la fracción total disponible que será admitida en el canal en un día concreto. Esta expresión depende tanto del tiempo de

## Capítulo 4

concentración como de un coeficiente denominado *surlag*. Así, cuanto más bajo es el *surlag* para un  $t_c$  dado, mayor será el agua retenida en la cuenca.

Las pérdidas por transmisión se determinaron según el procedimiento definido por el SCS (Lane, 1983). Dicho método evalúa la reducción en el volumen de escorrentía (resultado de procesos tales como la infiltración en el aluvial), a medida que la onda de avenida propaga hacia aguas abajo, y asumiendo que el agua percola hacia el acuífero superficial. SWAT calcula las pérdidas por transmisión sin datos observados y suponiendo que no hay flujo lateral u otras contribuciones de flujo.

### 7. Método de estimación de la escorrentía en áreas urbanas.

SWAT aplica el método del *Soil Conservation Service Engineering Division* (1986), que diferencia las áreas urbanas del resto de los usos del suelo en base a la definición de la fracción de área impermeable que incrementa el volumen y velocidad del agua de escorrentía. De este modo, la escorrentía se calculó por separado para las áreas impermeables conectadas y áreas impermeables/permeables desconectadas. En áreas impermeables se usó una  $CN=98$ , mientras que en áreas desconectadas la  $CN$  es una composición de diferentes  $CN$  (Ecuación 4.8 y 4.9).

$$CN_c = CN_p + imp_{tot}(CN_{imp} - CN_p) \left(1 - \frac{imp_{dcon}}{2 imp_{tot}}\right) \text{ si } imp_{tot} < 0,30 \quad (4.8)$$

$$CN_c = CN_p + imp_{tot}(CN_{imp} - CN_p) \quad \text{ si } imp_{tot} > 0,30 \quad (4.9)$$

Donde:  $CN_c$  es la  $CN$  compuesta para una condición de humedad antecedente II (CHA II),  $CN_p$  es la  $CN$  para áreas permeables (CHA II),  $CN_{imp}$  es la  $CN$  para áreas impermeables (CHA II),  $imp_{tot}$  es la fracción impermeable, y  $imp_{dcon}$  es la fracción de la HRU que es impermeable pero no está conectada hidráulicamente al sistema de drenaje.

### 8. Método de cálculo de la propagación del agua en canales.

La propagación del agua en los cursos de agua, se puede caracterizar mediante el método de Muskingum (McCarthy, 1938) o el método de propagación de

## Capítulo 4

almacenamiento variable (Williams, 1969). Ambos métodos derivan del modelo de la onda cinemática. En esta tesis, se utilizó el segundo de los métodos, que para un tramo dado asume que la propagación se basa en la ecuación de la continuidad (4.10).

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored}$$

Donde:  $V_{in}$  volumen de agua que ingresa en un paso de tiempo ( $m^3 H_2O$ ),  $V_{out}$  volumen de agua que sale en un paso de tiempo ( $m^3 H_2O$ ),  $\Delta V_{stored}$  es el cambio en el almacenamiento durante el paso de tiempo ( $m^3 H_2O$ ).

### 9. Pérdidas por transmisión.

En los periodos en los que el cauce no recibe ninguna contribución de agua subterránea, el canal puede perder agua desde los bancos de almacenamiento en la orilla y el lecho. En este contexto las pérdidas por transmisión se estimaron con la Ecuación 4.11.

$$tloss = K_{ch} TTP_{ch} L_{ch} \quad (4.11)$$

Donde:  $tloss$  son las pérdidas del canal ( $m^3 H_2O$ ),  $K_{ch}$  es la conductividad hidráulica efectiva del canal ( $mm/h$ ),  $TT$  es el tiempo de recorrido del flujo ( $h$ ),  $P_{ch}$  es el perímetro húmedo ( $m$ ), y  $L_{ch}$  es la longitud del canal ( $km$ ).

SWAT también considera las pérdidas por evaporación que fueron calculadas mediante la Ecuación 4.12

$$E_{ch} = coef_{ev} E_o L_{ch} W fr_{\Delta t} \quad (4.12)$$

Donde:  $E_{ch}$  es la evaporación desde el curso para el día ( $m^3 H_2O$ ),  $coef_{ev}$  es un coeficiente de evaporación,  $E_o$  es la evaporación potencial ( $mm H_2O$ ),  $L_{ch}$  es la longitud del canal ( $km$ ),  $W$  es el ancho del curso de agua al nivel del canal ( $m$ ) y  $fr_{\Delta t}$  es la fracción de tiempo en que el agua fluye en el canal.

Asimismo, el modelo tiene en cuenta la contribución de agua hacia los cursos de agua desde el almacenamiento de banco ( $bnk$ ), o en dirección hacia la zona no saturada en demanda de la evapotranspiración ( $bnk_{revap}$ ). El flujo de agua fue

## Capítulo 4

simulado mediante una curva de recesión similar a la usada por la caracterización del agua subterránea (Ecuación 4.13).

$$V_{bnk} = bnk(1 - \exp[-\alpha_{bnk}]) \quad (4.13)$$

Donde:  $V_{bnk}$  es el volumen de agua que se sale o retorna al almacenamiento de banco ( $m^3 H_2O$ ),  $bnk$  es la cantidad total de agua del almacenamiento de agua ( $m^3 H_2O$ )  $bnk_{revap}=bnk$  si  $bnk < bnk_{revap,max}$  y  $bnk_{revap}=bnk_{revap,max}$  si  $bnk \geq bnk_{revap,max}$ ,  $\alpha_{bnk}$  es la constante de recesión del flujo del almacenamiento de banco.

### 10. Balance de agua en el canal.

Por último, el agua almacenada en el río al final de cada paso de tiempo fue calculada de acuerdo con la Ecuación 4.14.

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (4.14)$$

Donde:  $V_{stored,2}$  es el volumen de agua en el curso de agua al final del paso de tiempo ( $m^3 H_2O$ ),  $V_{stored,1}$  es el volumen de agua en el curso de agua al comienzo del paso de tiempo ( $m^3 H_2O$ ),  $V_{in}$  es el volumen de agua que entra en el paso de tiempo considerado ( $m^3 H_2O$ ),  $V_{out}$  es el volumen de agua que sale en el paso de tiempo considerado ( $m^3 H_2O$ ),  $tloss$  son las pérdidas del canal ( $m^3 H_2O$ ),  $E_{ch}$  es la evaporación desde el curso para el día ( $m^3 H_2O$ ),  $div$  es el volumen de agua agregado o removido del río a través de derivaciones,  $V_{bnk}$  es el volumen de agua que se sale o retorna al almacenamiento de banco ( $m^3 H_2O$ ).

#### 4.4.2. Evaluación de la performance del modelo

El grado de idoneidad del modelo fue evaluado automáticamente mediante una interface de SWAT denominada SWAT-CUP4. Este programa cuenta con cinco métodos de evaluación: *Sequential Uncertainty Fitting ver. 2* (SUF2) (Abbaspour *et al.*, 2004; 2007), *Particle swarm optimization* (PSO) Eberhart y Kennedy (1995), *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE) (Beven and Binley, 1992), *Parameter Solution* (ParaSol) (Van Griensven and Meixner, 2006) y *Markov chain Monte Carlo* (MCMC) (p.e., Kuczera and Parent, 1998; Marshall *et al.*, 2004; Vrugt *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007). De entre todos ellos, se optó por el método SUFI-2, en el cual la incerteza de los

## Capítulo 4

parámetros es contabilizada para todas las fuentes que producen incertidumbre, a saber: variables de entrada; modelo conceptual diseñado; e incluso también incertezas en la medición de los datos. Esta herramienta permite realizar juntamente el análisis de sensibilidad, la calibración/validación y el análisis de incertezas. Autores como (Monireh, *et al.*; 2009) y (Schoul y Abbaspour; 2006) han concluido que es un procedimiento eficiente y útil para la cuantificación de la optimización e incertidumbre.

Las incertidumbres se cuantifican con una medida llamada factor-P, que es el porcentaje de los datos observados acotados en el 95 % de la predicción de la incertidumbre (95PPU). La incertidumbre en los parámetros de entrada se representa mediante una distribución uniforme. El 95PPU se calcula como el 2.5 % y 97.5 % de la distribución acumulada de las variables de salida obtenida a través del método de muestreo hipercubo latino (Abbaspour *et al.*, 2004; 2007), rechazando el 5 % de las simulaciones muy malas. Para ello, se subdivide la distribución de cada parámetro en “n” rangos, cada uno con una probabilidad de ocurrencia igual a  $1/n$ . Luego se generan valores aleatorios de cada parámetro, de manera que cada rango se muestrea sólo una vez. El modelo se ejecuta “n” veces con las combinaciones aleatorias de los parámetros. Así, todas las incertezas son reflejadas en las variables de salida medidas (p.e. caudal). Como resultado, la predicción de las incertidumbres con el 95PPU es una buena medida para evaluar el rigor del análisis de incertidumbre.

Otra medida vinculada al método es el factor-R, que es el espesor medio de la banda de incertidumbre de 95PPU dividida por la desviación estándar de los datos medidos. SUFI-2 trata de mantener la mayor cantidad de datos observados dentro de la banda de incertidumbre (con un factor-P máximo cercano a 1) y con el mínimo valor posible del factor-R (cercano a 0). Por lo tanto, si P es 1 y R es 0 se concluye que la simulación reproduce exactamente los datos observados. El proceso comienza suponiendo una gran incertidumbre del parámetro de entrada, de modo que los datos caen dentro del

## Capítulo 4

95PPU. A medida que se controlan los valores de los factores P y R la incertidumbre va disminuyendo. El rango de cada parámetro se actualiza en cada paso, de tal forma que sea siempre más pequeño que el anterior, a la vez que más próximo a la mejor simulación (Abbaspour *et al.*, 2004; 2007).

La variable observada que se utilizó para evaluar el funcionamiento del modelo y calibrar fue el caudal diario y mensual medido en la sección de control de la cuenca. A este respecto, se definió un período de 14 años (1 de enero de 1979 al 31 de diciembre de 1992) en el que se representaron tanto periodos húmedos como secos. La calibración y validación se abordaron a escala de tiempo de paso mensual y diario y para la cuenca en general. Es decir, no se aplicaron filtros de ningún tipo, tales como: grupo hidrológico, textura de suelo, uso de suelo, subcuenca, pendiente, práctica de manejo, entre otros. De este modo, se modificaron simultáneamente los parámetros en todas las subcuencas y horizontes de suelo, aplicando los mismos valores en cada subcuenca. Además de la aplicación de filtros en las diferentes subcuencas, combinando cualesquiera que el usuario deseara, los parámetros a su vez pueden ser modificados aplicando al parámetro en sí uno de los tres modos de cambios propuestos:

1. sustituir un valor por otro ( $v_x$ ),
2. reducir o aumentar un porcentaje de los mismos ( $r_x$ )
3. sumar o restar un valor ( $a_x$ ).

A continuación se explicará brevemente el algoritmo desarrollado por SUFI-2 en cada iteración y cuyo análisis se encuentra en mayor detalle en Abbaspour (2013):

1. Elección de la función objetivo: SUFI-2 incluye siete tipos y cada una de ellas lleva a un resultado diferente, el rango final de los parámetros está condicionado con la función objetivo. De ellas se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y coeficiente de Nash – Sutcliffe, NSE, (1970).

## Capítulo 4

2. Determinación de los rangos máximos y mínimos absolutos de los parámetros a ser optimizados. Por falta de información se asume, que todos los parámetros están uniformemente distribuidos, como los rangos de los parámetros de los valores absolutos juegan un papel importante, se considera que deben ser amplios y físicamente posibles. Aquí se optó por dejar estos valores por default.

$$b_j: b_{j, \min. \text{ abs}} \leq b_j \leq b_{j, \max. \text{ abs}} \quad j=1 \dots m \quad (4.15)$$

Dónde:  $b_j$  es el  $j$ -ésimo parámetro y  $m$  es el número de parámetros a ser estimados.

3. Análisis de sensibilidad absoluto (*on-at-a-time*): en las etapas iniciales de la calibración se realizó el análisis de sensibilidad de todos los parámetros, mediante el método paso a paso. Este método hace variar un parámetro y deja el resto constante. Su finalidad es determinar cuáles de los parámetros de entrada tienen una mayor influencia a la hora de estimar los caudales simulados; y así seleccionarlos durante la fase de calibración. En cada parámetro se ejecutaron 3 simulaciones, dentro de su rango permitido. Luego, se comparó visualmente el resultado gráfico del caudal observado y simulado y se seleccionaron aquellos parámetros de mayor influencia en los componentes del escurrimiento.
4. Definición de rangos de los parámetros: en base a las características del área de estudio, se establecieron para cada parámetro los valores máximos y mínimos físicamente posibles. Lo anterior, se basó principalmente en estimaciones regionales procedentes de una exhaustiva revisión bibliográfica, a excepción de los parámetros de suelo que fueron estimados a partir de las mediciones en el campo de cada suelo modal.

$$b_j: b_{j, \min.} \leq b_j \leq b_{j, \max.} \quad j=1 \dots m \quad (4.16)$$

Aunque son importantes, estas estimaciones iniciales son subjetivas, se van actualizando y pueden cambiar dentro de los rangos absolutos.

## Capítulo 4

5. Muestreo por el método de hipercubo latino (McKay *et al.*, 1979): este método conduce a  $n$  combinaciones de parámetros, donde  $n$  es el número de simulaciones. El valor de  $n$  debería ser relativamente alto, entre 500-1000 simulaciones (Abbaspour, 2011). En la tesis se seleccionó un  $n= 100$ , en el que el programa se ejecutó 100 veces, y en el que para cada simulación el software calcula las variables de interés para la calibración.
6. Evaluación de las simulaciones y cálculo de la función objetivo: primero se calculó la función objetivo “g” y luego una serie de parámetros para evaluar cada muestreo. Primero se obtuvo la matriz de sensibilidad J (Ecuación 4.17).

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta b_j} \quad i = 1, \dots, C_2^n \quad j = 1, \dots, m \quad (4.17)$$

Donde:  $C_2^n$  es el número de filas de la matriz de sensibilidad (igual a todas las combinaciones posibles de las dos simulaciones),  $j$  es el número de columnas (numero de parámetros).

Seguidamente, se obtuvo el equivalente a la matriz Hessiana (H) que se calculó mediante el método de Gauss-Newton, despreciando las derivadas de alto orden (Ecuación 4.18).

$$H = J^T J \quad (4.18)$$

Donde: H es la matriz,  $J^T$  es la matriz de sensibilidad transpuesta y J es la matriz de sensibilidad.

A continuación, y en base al teorema de Cramer-Rao (Press *et al.*, 1992) (Ecuación 4.19) se calculó una estimación del límite inferior de la matriz de covariancia de los parámetros C.

$$C = S_g^2 (J^T J)^{-1} \quad (4.19)$$

Donde:  $S_g^2$  es el valor de la varianza de la función objetivo resultante de las  $n$  simulaciones.

## Capítulo 4

La estimación de la desviación estándar y el intervalo de confianza del 95% del parámetro  $b_j$  se calculó a partir de los elementos de la diagonal de C (Press *et al.*, 1992).

$$S_j = \sqrt{C_{jj}} \quad (4.20)$$

$$b_{j.inf.} = b_j^* - t_{v,0.025} S_j \quad (4.21)$$

$$b_{j.sup.} = b_j^* + t_{v,0.025} S_j \quad (4.22)$$

Dónde:  $b_j^*$  es el parámetro b de una de las mejores soluciones (del menor valor de la función objetivo) y v es el grado de libertad (n-m).

La correlación de los parámetros se determinó usando los términos diagonales y fuera de la diagonal de la matriz de covarianza (Ecuación 4.23):

$$r_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}C_{jj}}} \quad (4.23)$$

La matriz de correlación  $r$  cuantifica el cambio en la función objetivo, como resultado de la variación de un parámetro  $i$  y el cambio relativo en otro parámetro  $j$ . Como se permite el cambio de todos los parámetros, la correlación entre dos parámetros cualesquiera va a ser pequeña. Esto es esperable debido a que los sets de parámetros en SUFI-2 son obtenidos de manera opuesta al procedimiento normal (cuando se mantienen constantes todos los parámetros mientras uno sólo varía).

7. Sensibilidad de los parámetros: la sensibilidad se determinó mediante el análisis de sensibilidad global. El cual se establece después de una iteración y aplicando un sistema de regresión múltiple. La regresión se realiza entre el conjunto de

## Capítulo 4

parámetros generados por el método hipercubo latino de la iteración vigente “ $b_i$ ” y los valores de la función objetivo (Ecuación 4.24).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (4.24)$$

Para identificar la significancia relativa de cada parámetro  $b_i$ , el programa aplica el test *t de student*. El grado de sensibilidad de cada uno lo estima a partir de la media de las variaciones de la función objetivo. Estas variaciones son resultado del cambio sufrido por cada parámetro cuando todos los parámetros cambian simultáneamente. Por lo tanto, el test *t* aporta una sensibilidad relativa basada en aproximaciones lineales, de manera que sólo se obtiene información parcial sobre la sensibilidad de la función objetivo hacia los parámetros. Además, las sensibilidades relativas de los diferentes parámetros, como se indica con el test *t*, dependen de los intervalos de los parámetros. Por lo tanto, el rango de parámetros sensibles puede ir cambiando en cada iteración.

8. Evaluación de la incertidumbre: debido a que SUFI-2 es un proceso estocástico, se calcula el 95% de predicción de incertidumbres (95PPU) para todas las variables en la función objetivo. El 95PPU se calcula como los percentiles 2,5 ( $X_L$ ) y 97,5 ( $X_U$ ) de la distribución acumulada de todos los puntos simulados. Por lo tanto, la bondad del ajuste es evaluada mediante la medida de la incertidumbre; y la cual se calcula a partir del porcentaje de datos observados acotado por el 95PPU y de la distancia media  $\bar{d}$  entre en límite superior e inferior de 95PPU (o del grado de incertidumbre). La distancia media se obtiene con la Ecuación 4.25.

$$\bar{d}_x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (X_U - X_L)_i \quad (4.25)$$

## Capítulo 4

Donde:  $k$  es el número de puntos con datos observados,  $XL$  es el percentil 2.5 y  $XU$  es el percentil 97.5.

El mejor resultado se obtiene cuando el 100% de las medidas están acotadas en el 95PPU y la distancia  $\bar{d}$  es cercana a cero. No obstante, debido a los errores de los parámetros de entrada y de las incertidumbres del modelo, estos valores ideales nunca se alcanzan. Es deseable alcanzar un valor del factor-R menor a 1.

9. Actualización de los rangos de los parámetros para calibración: debido a que inicialmente el rango establecido es amplio, (dado que originalmente la incertidumbre del parámetro es elevada) los valores de  $\bar{d}$  tienden a ser bastante elevados durante el primer muestreo. Como resultado, en iteraciones sucesivas hubo que actualizar los rangos de los parámetros e ir reduciendo su amplitud (Ecuación 4.26 y 4.27), consiguiéndose de esta manera la calibración del modelo.

$$b'_{j,min} = b_{j,inf} - \text{Max} \left( \frac{b_{j,inf} - b_{j,min}}{2}, \frac{b_{j,max} - b_{j,sup}}{2} \right) \quad (4.26)$$

$$b'_{j,max} = b_{j,inf} + \text{Max} \left( \frac{b_{j,inf} - b_{j,min}}{2}, \frac{b_{j,max} - b_{j,sup}}{2} \right) \quad (4.27)$$

Donde:  $b'$  indica los valores actualizados,  $b_{j,inf}$  y  $b_{j,sup}$  son los parámetros obtenidos en la mejor simulación.

10. Validación del modelo: el proceso de validación consistió en medir la capacidad predictiva del modelo, mediante la comparación del caudal simulado y el observado, en un periodo diferente al de calibración. Para ello, se utilizó el mismo esquema metodológico planteado en la calibración, definiéndose un periodo de 6 años (1 de enero de 1993 a diciembre de 1998). El programa se corrió para una sola simulación.

## Capítulo 4

### 4.4.3. Obtención de los valores de humedad de suelo simulados

Luego de calibrar y validar el modelo, se extrajeron los valores de humedad de suelo simulada (HSS). Para tal propósito, se corrió nuevamente el modelo considerando el periodo completo de calibración y validación (1975-1998), estimándose la incertidumbre del periodo completo con SUFI-2. A continuación, se extrajeron los datos de contenido de agua en el suelo *soil water* (SW) de los archivos de salida *tables out (.sub)* para cada una de las subcuencas y para el periodo (1982-1998), obteniéndose de este modo la HSS.

Los datos de HSS se filtraron, mediante el cálculo de la anomalía estandarizada, con el fin de hacer una apreciación más adecuada de los momentos de déficit y excesos, y así poder relacionarla con los índices SPI y NDVI. Los valores de signo negativo de la anomalía indican un contenido de humedad más bajo de lo normal. La anomalía estandarizada se calculó mediante la siguiente ecuación (Ecuación 4.28):

$$aHSS = \frac{x_i - \bar{x}}{St} \quad (4.28)$$

Donde:  $x_i$  indica el valor observado de un mes del HSS,  $\bar{x}$  el valor promedio histórico de un mes del HSS y  $St$  el desvío estándar histórico de un mes del HSS.

### 4.5. Índice de precipitación estandarizado SPI

Una forma efectiva de evaluar la ocurrencia de déficit o excesos significativos por su intensidad y/o duración es mediante el uso del índice de precipitación estandarizado (SPI, *Standardized Precipitation Index*) (McKee *et al.*, 1993). El SPI se calcula ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación de un lugar dado (en la escala de tiempo de interés: mensual, trimestral, semestral,...) con una función teórica de densidad de probabilidad. La función de densidad es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media igual a 0 y varianza igual a 1), siendo el SPI el valor resultante de esta transformación, y quedando definido por el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico

## Capítulo 4

(representado por 0). Estos valores de SPI se asocian a una probabilidad acumulada de cada evento de lluvia. Lloyd-Hughes *et al.* (2002) interpretaron los valores y los relacionaron con una determinada categoría de severidad (Tabla 4.5).

El SPI se calculó para las estaciones meteorológicas NH0145 y NH0453, a escala temporal mensual, trimestral, semestral. El SPI 1 refleja condiciones a corto plazo y se relaciona con la humedad de suelo. El SPI 3 indica una estimación estacional de la lluvia, mientras que el SPI-6 da una tendencia a mediano plazo en los patrones de precipitación. Para su cálculo se aplicó el software SPI SL 6, que ha sido desarrollado por el *National Drought Mitigation Center* (NDMC). Se trata de una aplicación de dominio público que se descargó desde la página web <http://drought.unl.edu/MonitoringTools.aspx>. Para poder ser ejecutado, el programa requirió de datos mensuales de precipitación (de al menos 30 años consecutivos) y sin datos faltantes.

Tabla 4. 5. Valores de SPI y probabilidad acumulada asociados a una determinada categoría de severidad.

SPI	Probabilidad Acumulada	Categoría
-3 a -2	0,0228	Extremadamente seco
-1,5	0,0668	Muy seco
-1	0,1587	Moderadamente seco
-0,5	0,3085	Ligeramente seco
0	0,5000	Normal
0,5	0,6915	Ligeramente húmedo
1	0,8413	Moderadamente húmedo
1,5	0,9332	Muy húmedo
2 a 3	0,9986	Extremadamente húmedo

Así, se obtuvieron valores de SPI para el mismo período de tiempo en el cual se extrajeron los valores de HSS (1982-1998). Los resultados de cada estación, se distribuyeron espacialmente adjudicando a cada subcuenca la misma estación que designó SWAT. Para analizar la variación temporal, se estudió la evolución del SPI mediante

## Capítulo 4

gráficos de marcha mensual para así detectar la tendencia y los periodos donde se produjeron sequías severas y extremas, así como el número de eventos y su duración.

### 4.6. Índice verde

El índice verde que se adoptó fue el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) (Tarpley *et al.*, 1984), debido a que es un buen indicador para evaluar la aptitud de los modelos hidrológicos a la hora de predecir la disponibilidad de agua en el suelo (Narsimham, 2004). Para ello, se utilizó el set de imágenes NDVI quincenales, derivadas del sensor AVHRR (de 8 km de resolución espacial) y distribuidas gratuitamente por *Global Inventory Monitoring and Modelling Systems* (GIMMS) a través del servidor FTP de GLCF (<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/>). A pesar de que GLCF no ha continuado con su desarrollo, estas imágenes siguen siendo ampliamente usadas por muchísimos investigadores, ya que definen una serie histórica de 25 años compuesta de imágenes corregidas y calibradas geométrica y radiométricamente para su uso multitemporal (Tucker *et al.*, 2004). Para la composición de cada imagen quincenal de NDVI, estos autores utilizaron las imágenes de 15 días consecutivos, seleccionando el pixel de máximo NDVI, con el objeto de minimizar los errores por nubes y vapor de agua de la atmósfera.

El NDVI surge de la relación entre la diferencia y suma de las bandas del infrarrojo cercano (NIR: 0,72-1,10  $\mu\text{m}$ ) y rojo (red: 58-0,68  $\mu\text{m}$ ) del sensor AVHRR (Ecuación 4.24) (Jackson y Huete, 1991), caracterizándose por ser un índice sensible a la clorofila. La mayoría de los tipos de vegetación fotosintéticamente activa absorben fuertemente la radiación del rojo visible y débilmente la radiación en el infrarrojo cercano, dando como resultado una reflectancia pequeña y grande, respectivamente. Así, el NDVI se ha utilizado para indicar las condiciones y variaciones de la vegetación. El índice varía entre -1 y 1. Los valores positivos comprendidos entre 0,1 y 0,7 representan áreas vegetadas, los valores

## Capítulo 4

altos representan incrementos en la vegetación o vegetación con gran vitalidad. Por su parte, los valores negativos se interpretan como áreas no vegetadas tales como cuerpos de agua, hielo y nieve, mientras que los valores cercanos a 0 representan áreas de suelo desnudo.

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (4.29)$$

Se obtuvo una imagen compuesta cada 16 días que se promedió en forma mensual para el período 1982-1998. Asimismo, se determinó un valor medio del NDVI para cada subcuenca y mes, mediante operaciones espaciales de capas raster/vector utilizando ArcGis. Para analizar la variación temporal, se estudió la evolución de la marcha mensual. Previamente y al igual que con los valores de HSS, se filtraron los datos mediante el cálculo de la anomalía estandarizada (Ecuación 4.30), ya que el NDVI por *default* no permite determinar los momentos de sequía adecuadamente. Los valores de la anomalía se interpretaron de la siguiente manera: los signos negativos indicaron una respuesta de la vegetación más baja de lo normal, mientras que los valores positivos señalaron lo opuesto. La razón que justifica este planteamiento es que los valores por subcuenca parten del promedio de varios píxeles de baja resolución espacial, a lo que se le suma un ciclo anual muy marcado del índice.

$$aNDVI = \frac{x_i - \bar{x}}{St} \quad (4.30)$$

Donde:  $x_i$  indica el valor observado de un mes del NDVI,  $\bar{x}$  el valor promedio histórico de un mes del NDVI y  $St$  el desvío estándar histórico de un mes del NDVI.

Para analizar la variación espacial de la aNDVI se aplicó un método de regionalización con el fin de determinar el comportamiento del índice en el espacio. Para ello, se combinaron dos métodos: Análisis de Componentes Principales (ACP) y algoritmo de agrupamiento no-jerárquico de k-means. Esta metodología fue aplicada previamente y

## Capítulo 4

se encuentra desarrollada en forma más extensa por Betolli *et al.* (2010) y Raziei *et al.* (2008). Estos autores analizaron principalmente el comportamiento espacial de diferentes variables climáticas e índices de sequía.

El ACP se aplicó en modo-S, lo que permitió el agrupamiento de las subcuencas que presentaron variaciones similares en el espacio. En relación a la matriz de similitud se utilizó la matriz de correlaciones, que le dió el mismo peso a todas las variables de entrada (aNDVI de las diferentes subcuencas). Como el NDVI es una variable asociada a la precipitación, humedad de suelo, evapotranspiración, ..., este agrupamiento permitió analizar si existían diferentes comportamientos del índice dentro de la cuenca. Como criterio de corte, se estableció incorporar todas las componentes que acumularan un porcentaje de varianza mayor al 80 %. Los autovectores resultantes se rotaron mediante el método varimax, debido a que la rotación permite una mejor interpretación física de los mismos. En el modo-s su resultado permitió una regionalización de las variables espacialmente distribuidas. Posteriormente, se determinaron y graficaron los factores de peso significativos y se separaron las diferentes regiones utilizando como criterio un umbral de factor de peso de 0,6.

Con el fin de discriminar las regiones que se encontraban en las zonas de intersección se aplicó el método de k-means. Se trata de un método de agrupamiento no-jerárquico y cuyo objetivo consiste en dividir los diferentes objetos en k grupos, de manera que se minimice la varianza entre grupos. Como entrada, se utilizaron las componentes rotadas obtenidas anteriormente. En primer lugar se determinó el número óptimo de grupos k mediante el test denominado pseudo-F de Calinski y Harabaz (1974) y recomendado por Betolli *et al.* (2010) (ver Ecuación 4.31).

## Capítulo 4

$$pseudo - F = \frac{A(n - k)}{W(k - 1)} \quad (4.31)$$

Donde: A y W es la varianza entre y dentro de cada grupo, n es el número de objetos estudiado y k es el número de grupos.

El cálculo del estadístico se realizó para diferentes números de grupos (entre 2 y 8), determinándose como óptimo el valor más alto de los valores encontrados. Una vez obtenido el número de grupos óptimo k, se aplicó el método k-means para determinar la composición final de cada grupo.

Finalmente, se estudió la relación entre la aNDVI y el SPI de 1 y 3 meses mediante un análisis de correlaciones, basado en el coeficiente de correlación de Pearson (con un nivel de significancia del 5%). Para ello, en primer lugar se analizó su comportamiento a nivel de cuenca y luego se analizó en forma mensual por cuenca y grupos, ya que la relación entre la vegetación y la precipitación varía con la estación de crecimiento presentando una marcada estacionalidad.

### **4.7. Correlación entre los índices SPI y NDVI con la humedad del suelo (HSS)**

Para explorar la relación entre los índices SPI y NDVI y la HSS se realizó un análisis de correlación, haciendo uso del coeficiente de correlación de Pearson (con un nivel de significancia del 5%) entre la aHSS y los índices SPI (1 y 3 meses) y la aNDVI. En todos los casos el análisis se realizó mensualmente por cuenca, debido a que la HSS fue calculada a paso mensual. Además, se utilizaron las series de aNDVI con un desfase de 0, 1 y 2 meses, ya que autores como Richards (2010) y Narasimhan (2004) manifestaron la existencia de un desfase temporal entre este índice, el SPI y la humedad de suelo. Asimismo, para aquellos valores de aNDVI que presentaron las correlaciones más altas se analizó su comportamiento a nivel de grupo.

## Capítulo 5

**Capítulo 5 : Resultados****5.1. Datos de entrada al modelo SWAT****5.1.1. Datos hidrometeorológicos****5.1.1.1. Datos Climáticos**

De las estaciones incluidas inicialmente, SWAT sólo admitió las estaciones NH0145 y NH0453. Las estaciones meteorológicas presentaron sus series climáticas lo suficientemente completas para ser utilizadas sin inconvenientes y con relativamente pocos *outliers*. En las Figuras 5.1 y 5.2 se muestran la marcha diaria de las series de precipitación y diferencia de temperatura respectivamente. A este respecto, se ha considerado como valores anormales aquéllos que se encuentran por encima del límite *outlier* (en rojo).

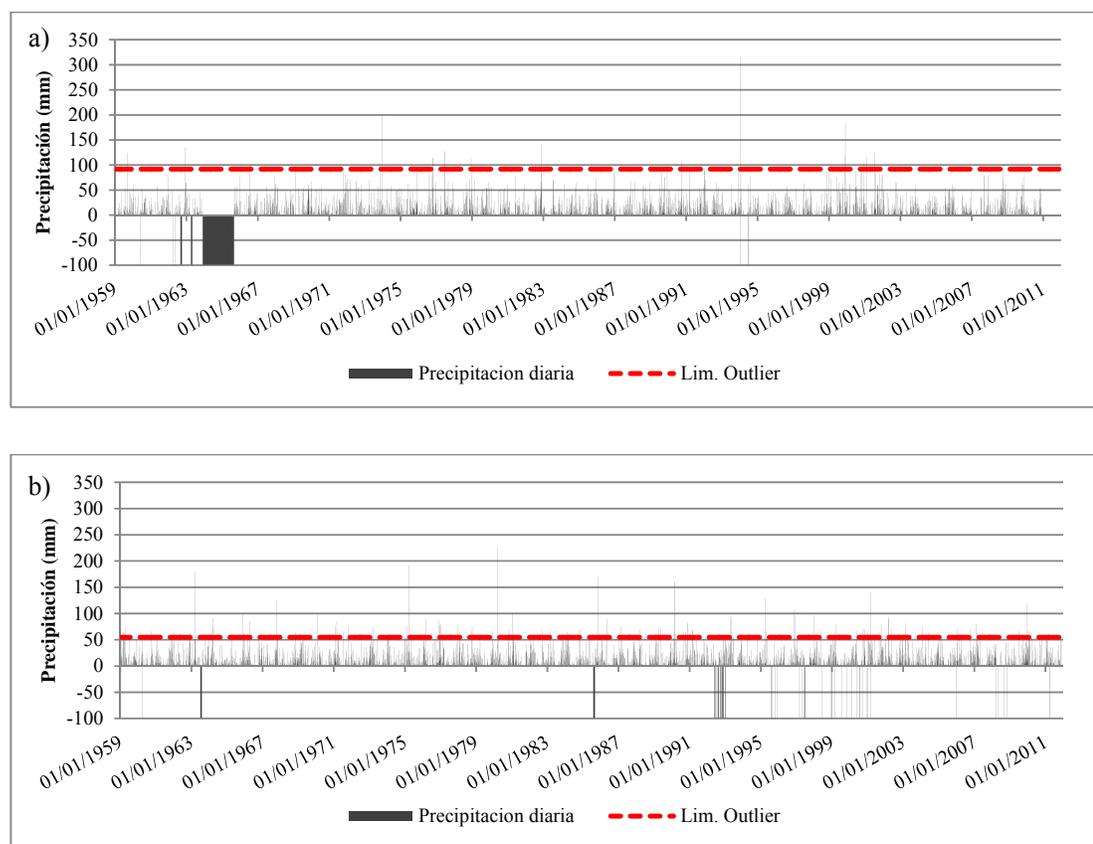


Figura 5. 1. Marcha diaria de las series de precipitación. a) Estación meteorológica NH0145, b) Estación meteorológica NH0453.

## Capítulo 5

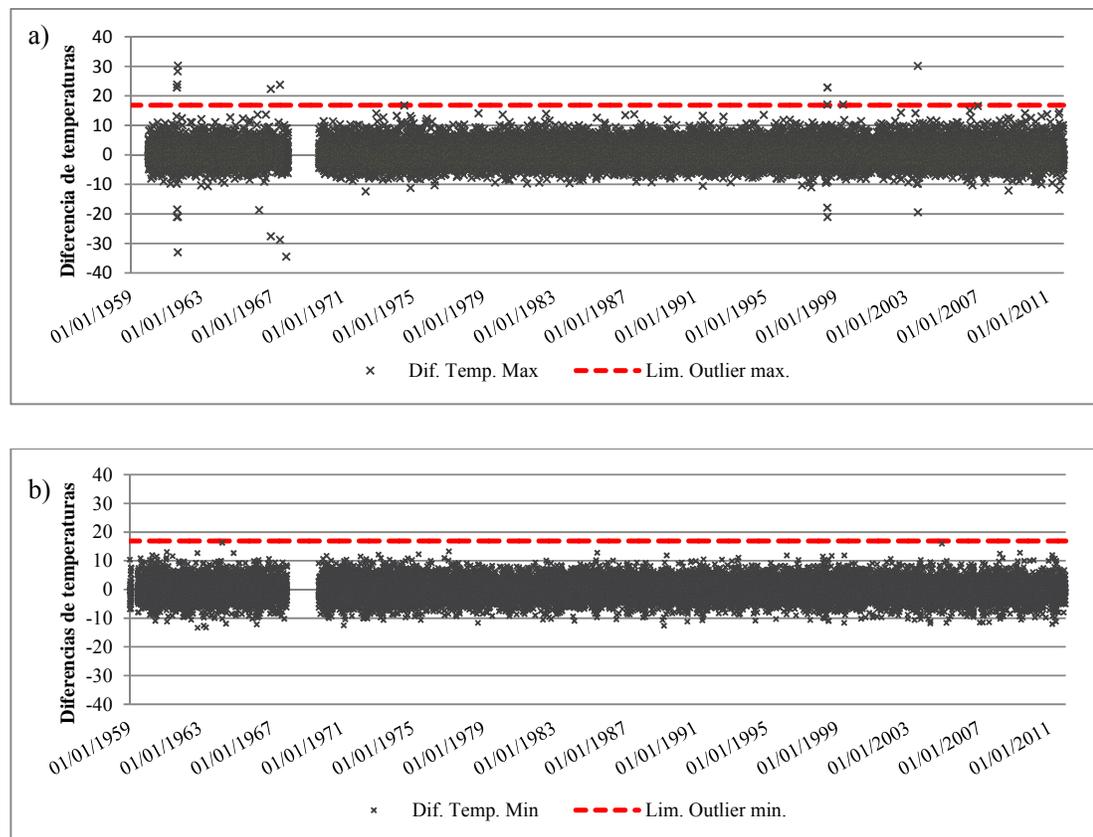


Figura 5. 2. Marcha diaria de las series diferencias de temperatura para la Estación meteorológica NH0145. a) Diferencia de máximos, b) diferencia de mínimos.

El Test de Mann-Kendall, para las estaciones Pergamino NH0145 y Junín NH0453 (Figuras 5.3 y 5.4), determinó un valor  $Z_{MK}$  de 0,31 (para la estación de Pergamino NH0145) y un  $Z_{MK}$  de 0,57 (para la estación de Junín NH0453), mostrando un ligero ascenso de las precipitaciones anuales a lo largo de las últimos 5 décadas. Sin embargo, estos valores no son estadísticamente significativos (con un nivel de confianza  $\alpha=0,05$  para la tabla de dos colas) indicando que no hay una tendencia de incremento evidente en los datos.

## Capítulo 5

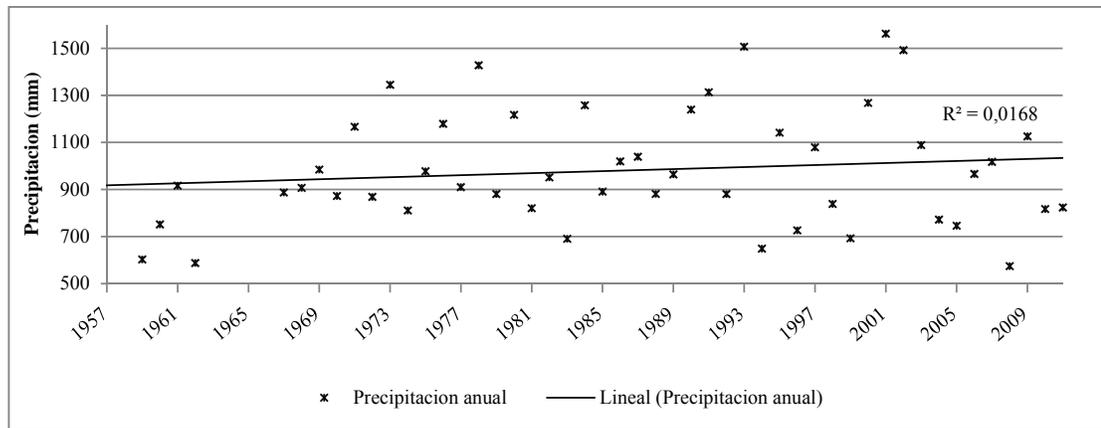


Figura 5. 3. Serie de precipitación total anual y tendencia lineal de la estación “Pergamino NH0145” (1957-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012).

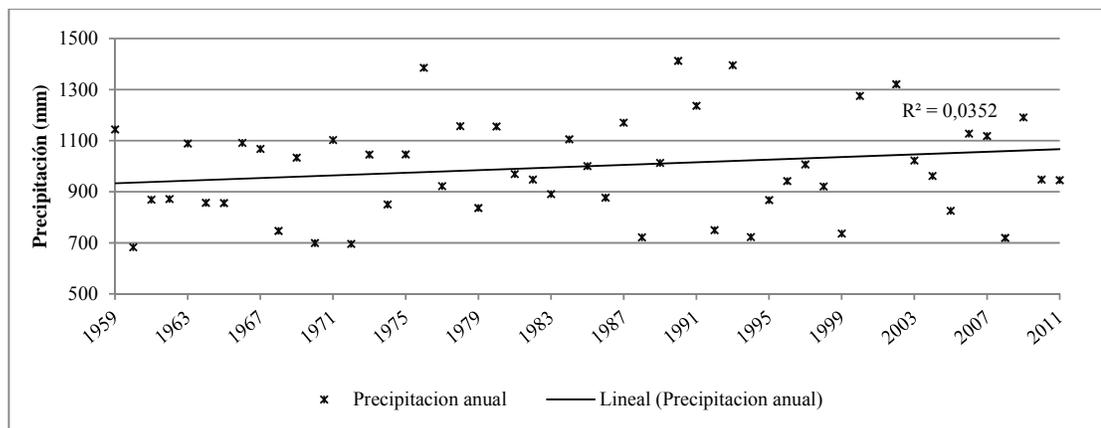


Figura 5. 4. Serie de precipitación total anual y tendencia lineal de la estación “Junín NH053” (1959-2011). Elaboración propia en base a datos de SIGA (2012).

#### 5.1.1.2. Datos Hidrológicos

Para poder calibrar y validar los diferentes parámetros del modelo, se requieren como variables conocidas datos hidrológicos (p.e. el caudal). Para ello, se dispuso la serie de caudales de la estación Arrecifes N° HL 4035, la cual es incompleta y presenta algunos años con pocos o incluso sin registros. Esta serie fue sometida a un control de calidad para corroborar la homogeneidad y consistencia de los datos. Los *outliers* máximos y mínimos se identificaron calculando un umbral superior ( $527 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) e inferior ( $1,1 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) de la serie anual (Figura 5.5) mediante el método de análisis de frecuencia de extremos propuesto por Chow *et al.* (1994). En el umbral máximo no se encontraron valores

## Capítulo 5

extremos que lo superasen, mientras que en el mínimo se observaron 47 casos (en toda la serie) que correspondían con periodos secos. Todos los datos ausentes fueron reemplazados con el valor -99,0.

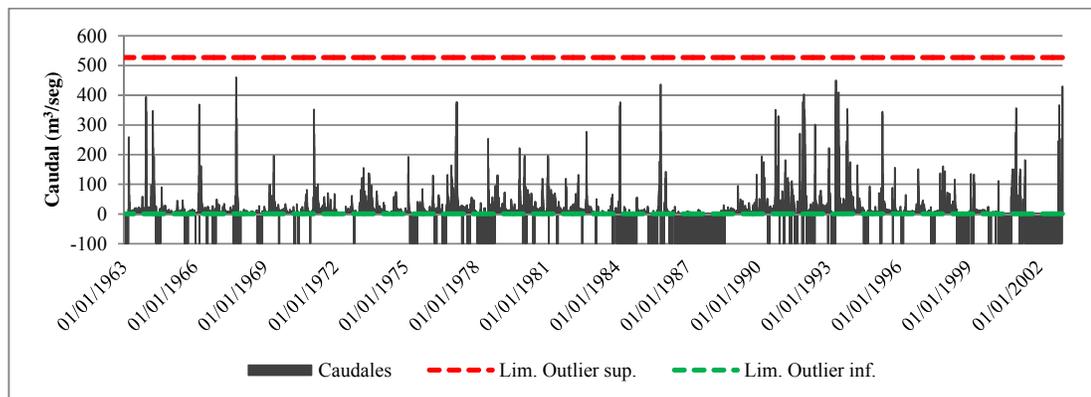


Figura 5. 5. Marcha diaria de la serie de caudal en la que se identifican los outliers máximos y mínimos.

El Test de Mann-Kendall aplicado sobre la serie de aportación anual, determinó un valor  $Z_{MK}$  de 0,60 que revela un leve aumento de los caudales, aunque el mismo no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza  $\alpha=0,05$  (para la tabla de dos colas), indicando que no hay una tendencia evidente en los años considerados de la serie. En la Figura 5.6 se muestra la evolución de las aportaciones anuales para el periodo 1963-2002.

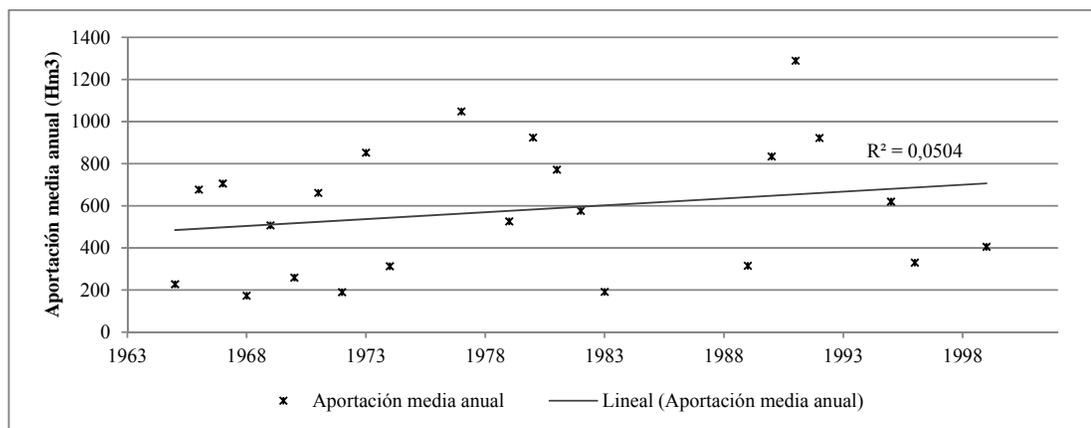


Figura 5. 6. Serie de aportación media anual y tendencia lineal de la estación “N° HL 4035” (1963-2002). Elaboración propia en base a datos del ADA.

## Capítulo 5

### 5.1.2. Datos topográficos

La información topográfica se derivó del SRTM-C de 30 metros de resolución espacial. Dicho modelo de datos tuvo que ser corregido al efecto de eliminar el ruido provocado por la vegetación de porte alto. En la Figura 5.7 se muestra el mapa de pendientes (en %) calculado a partir del MDE. Las pendientes se clasificaron en 3 clases: 0-2 %, 2-4 %, > al 4 %, ocupando la primera y segunda clase el 90 % de la superficie total. En general, las mayores pendientes (> 4 %) se distribuyen homogéneamente en toda el área, aunque ocupando pequeñas superficies.

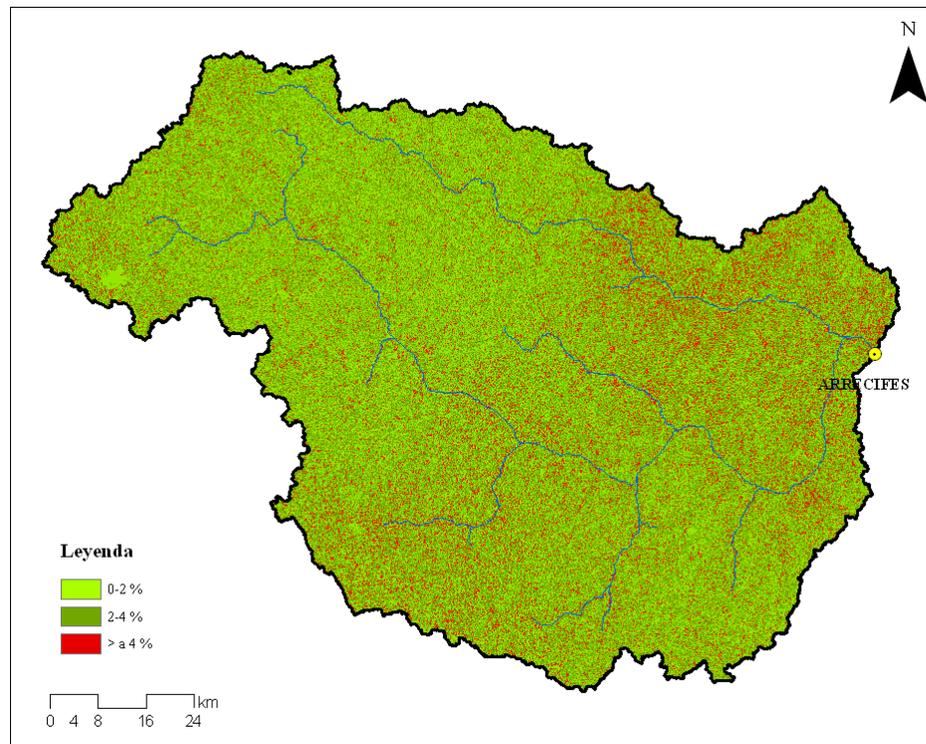


Figura 5. 7. Mapa de pendientes derivadas del MDE.

### 5.1.3. Datos de uso del suelo

En las Figuras 5.8 y 5.9 se pueden ver los mapas finales del uso del suelo obtenidos mediante la clasificación supervisada por objeto a partir de las imágenes satelitales Landsat 5 TM+. Las clases diferenciadas fueron: cultivos (entre los que destacan trigo, soja, maíz, girasol); recursos forrajeros (zonas ocupadas por mezcla de pasturas naturales y/o cultivos

## Capítulo 5

utilizados para forraje); suelo desnudo (áreas de barbecho por cultivo convencional o siembra directa); áreas urbanas; agua y montes. En base a observaciones sobre datos de campo e imágenes de alta resolución de *Google Earth*, se consideró que la clasificación realizada refleja en forma correcta la realidad, aunque la bondad de ajuste de los mapas finales no se pudo determinar por no disponer de la cantidad suficiente de datos de campo. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la cuenca del río Arrecifes se encuentra completamente antropizada y que su principal uso es el agropecuario. Asimismo se observa un marcado contraste respecto a los usos del suelo entre el periodo invernal y el estival.

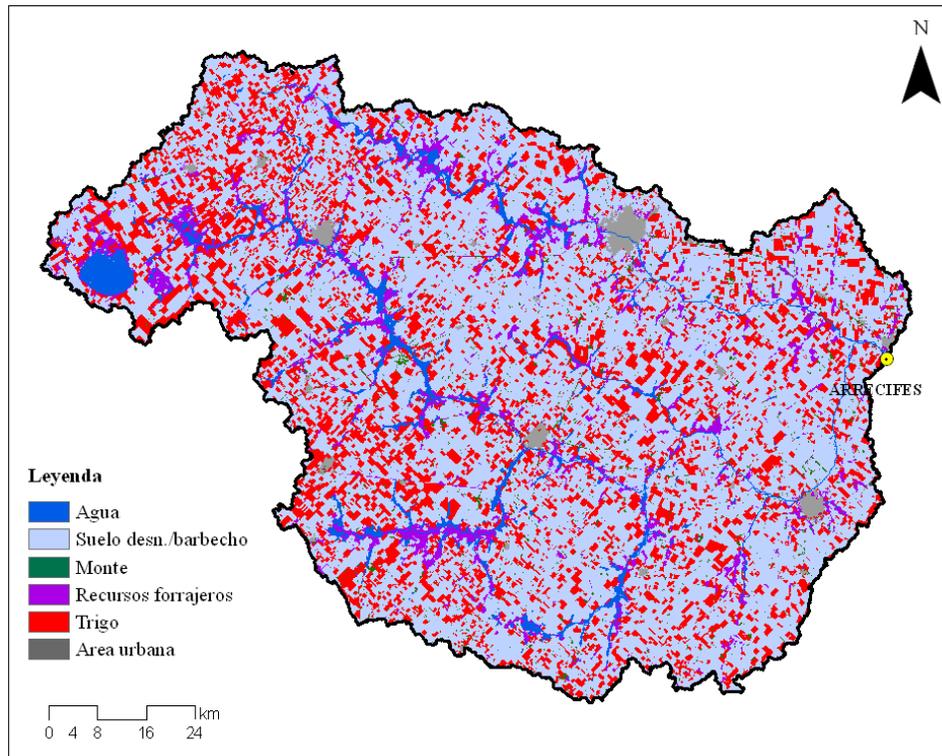


Figura 5. 8. Mapa de uso de suelo para el período invernal (campaña 2006-2007).

## Capítulo 5

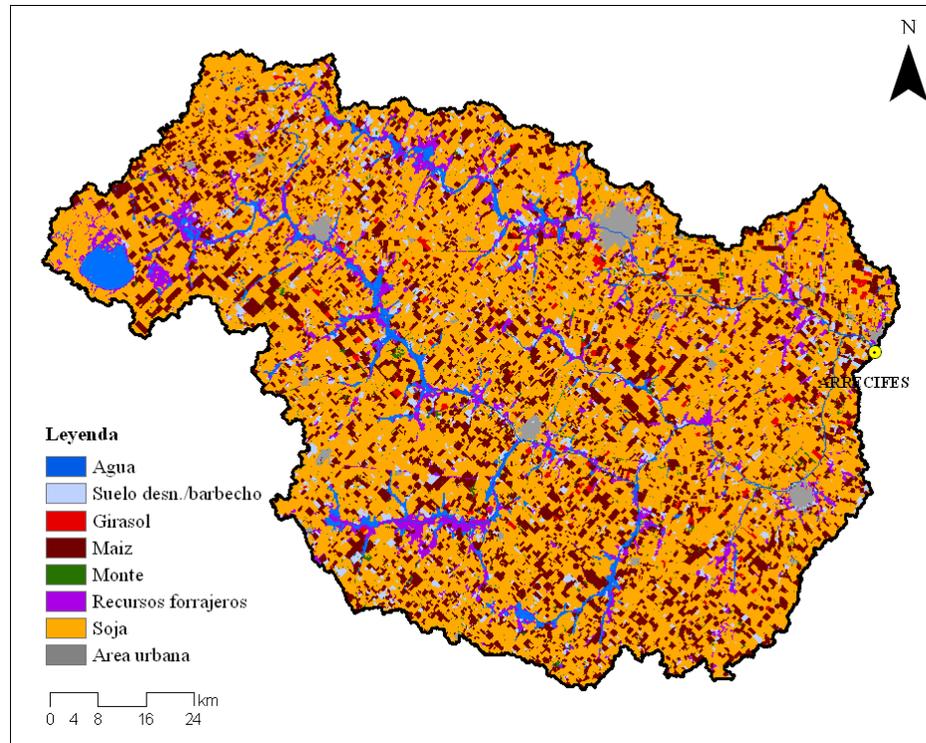


Figura 5. 9. Mapa de uso de suelo para el período estival (campana 2006-2007).

En la Tabla 5.1 se presentan las superficies resultantes para ambas estaciones. En el primer periodo, se puede ver que la clase suelo desnudo/barbecho ocupa el 51 % de la superficie, mientras que las clases trigo (23 %) y recursos forrajeros (22 %) constituyen el 45 % del área. Asimismo, hay que reseñar la participación de otras clases que únicamente representan el 4 % de la superficie total (p.e. montes, áreas urbanas, ríos y lagunas, etc.). En cambio, en la clasificación de verano, la proporción de la clase suelo desnudo/barbecho es significativamente menor ocupando únicamente el 2,4 %, mientras que los cultivos poseen la mayor proporción (superando el 84 %), quedando conformados por las siguientes clases: soja (64 %); maíz (19 %); y girasol (1 %). Por último, las clases restantes, se distribuyen en un 8 % de recursos forrajeros y un 6 % adicional correspondiente a otras clases (p.e. montes, áreas urbanas, ríos y lagunas, etc.).

## Capítulo 5

Tabla 5. 1. Superficie de las diferentes clases de uso de suelo para el período 2006-2007.

Clases de uso de suelo			
Periodo invernal	Superficie (km <sup>2</sup> )	Periodo estival	Superficie (km <sup>2</sup> )
Ríos y Lagunas	26,3	Ríos y Lagunas	46,7
Áreas inundadas	64,2	Áreas inundadas	200,8
Montes	128,4	Montes	128,4
Áreas urbanas	113,1	Áreas urbanas	113,1
Recursos forrajeros	1.877,6	Recursos forrajeros	662,5
Suelo desn./barbecho	4,4	Suelo desn./barbecho	210,0
Trigo	1.939,9	Soja	5.448,0
		Maíz	1.600,8
		Girasol	99,4

## 5.1.4. Datos de suelos

En la Figura 5.10 se muestra el mapa resultante de tipos de suelo luego de aplicar las correcciones topológicas y de georreferenciación necesarias. Cada unidad cartográfica se representó por el nivel de serie, que es el inferior de la taxonomía. En la Tabla 5.2 se muestra la composición de las unidades cartográficas considerando la taxonomía de *Soil Taxonomy* a nivel de Subgrupo; y de acuerdo con los suelos dominantes de cada una de las series. La clase que abarcó mayor superficie corresponde al suelo *Argiudol típico*, que incluye el 75,4% de la área total, seguido por los subgrupos *Hapludol típico* (5,6 %) y *Argiudol abruptico* (2,8 %). Mientras que dentro de las unidades clasificadas como no identificadas prevalecen los complejos indiferenciados (9,7 %).

El *Argiudol típico*, queda conformado por: i) el *horizonte A*, cuyo espesor varía entre 22 y 30 cm, presentando una textura franco limosa con contenidos de arcilla que oscilan entre 19 y 26 %, aunque en algunos casos puede contener hasta un 38-49 % de arcilla y 50-58 % de limos; ii) el *horizonte Bt*, que posee un espesor que varía entre 30 y 80 cm, oscilando su textura entre franco arcillo limosa y franco arcillosa con contenidos de arcilla entre 28 y 38 %; y iii) por el *solum* con un espesor entre 110 y 190 cm. No obstante, en algunos casos presenta el perfil truncado, pudiendo encontrarse asociado a otros suelos,

## Capítulo 5

de manera que las características finales de cada serie quedan representadas a nivel local. Generalmente, es un suelo bien drenado, de escurrimiento medio y permeabilidad moderada. La capacidad de uso es del tipo I-1: óptima (INTA, 2009), indicando que requiere poco o ningún tratamiento de manejo o conservación. El índice de productividad agrícola (INTA, 2009), varía entre 85 y 95. Estos valores son considerados muy altos, mientras que se definen como suelos poco productivos aquellos cuyos valores se encuentran entre 40 y 54 o directamente no agrícolas los que presentan valores menores a 39.

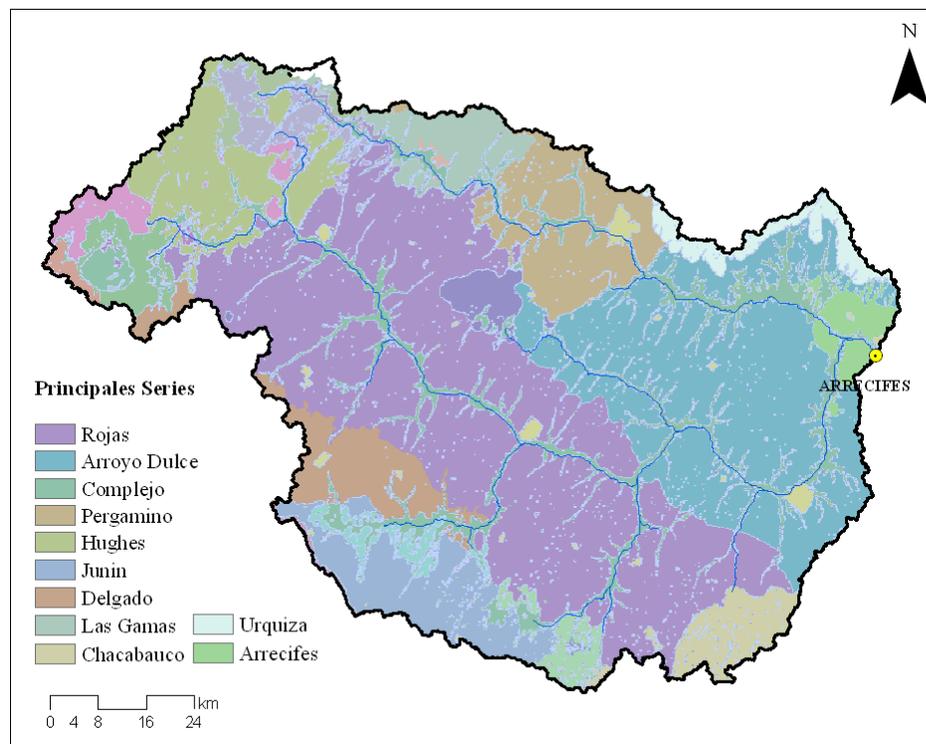


Figura 5. 10. Mapa de tipos de suelos a nivel de serie.

## Capítulo 5

Tabla 5. 2. Composición de las clases suelo en el área de estudio.

Orden principal	Taxonomía de serie principal	Área (km <sup>2</sup> )
Alfisolos	<i>Natracualf molico</i>	8,5
	<i>Natracualf tipico</i>	57,8
Total Alfisolos		66,3
Molisolos	<i>Argiacuol vertico</i>	17,7
	<i>Argialbol tipico</i>	1,4
	<i>Argiudol abruptico</i>	241,4
	<i>Argiudol acuico</i>	151,3
	<i>Argiudol tipico</i>	6.600,3
	<i>Argiudol vertico</i>	0,6
	<i>Hapludol acuico</i>	8,0
	<i>Hapludol tipico</i>	511,8
	<i>Natralbol tipico</i>	57,8
	<i>Paleudol tipico</i>	158,4
Total Molisolos		7.748,5
No clasificados	Complejo indiferenciado	852,1
	Lagunas	9,1
	Misceláneas	73,3
	Roca	0,2
Total No clasificados		934,8

## 5.2. Estimación de la humedad de suelo

### 5.2.1. Generación del modelo de cuenca

En la Figura 5.11 se muestra el mapa final de las subcuencas y de la red de drenaje. Se obtuvieron un total de 20 subcuencas, mostrándose sus parámetros principales en la Tabla 5.3. Las superficies de las subcuencas varían entre 61 km<sup>2</sup> (subcuenca 4) y 2.464 km<sup>2</sup> (subcuenca 14). La subcuenca 12, coincidente con la salida de cuenca, presenta la elevación más baja (49 m snm). Por el contrario, la subcuenca 4 posee la mayor altitud media (103 m snm), localizándose en el extremo oeste del ámbito estudiado. El número total de HRUs que caracterizó a la cuenca completa fue de 337. A este respecto, en la Tabla 5.3 se muestran las HRUs delineadas para cada subcuenca. Como se puede observar, la subcuenca 15 (12 HRUs) presenta menor variabilidad respecto al suelo y uso de suelo; mientras que las subcuencas 2 (24 HRUs) y 4 (10 HRUs) tienen la mayor variación.

## Capítulo 5

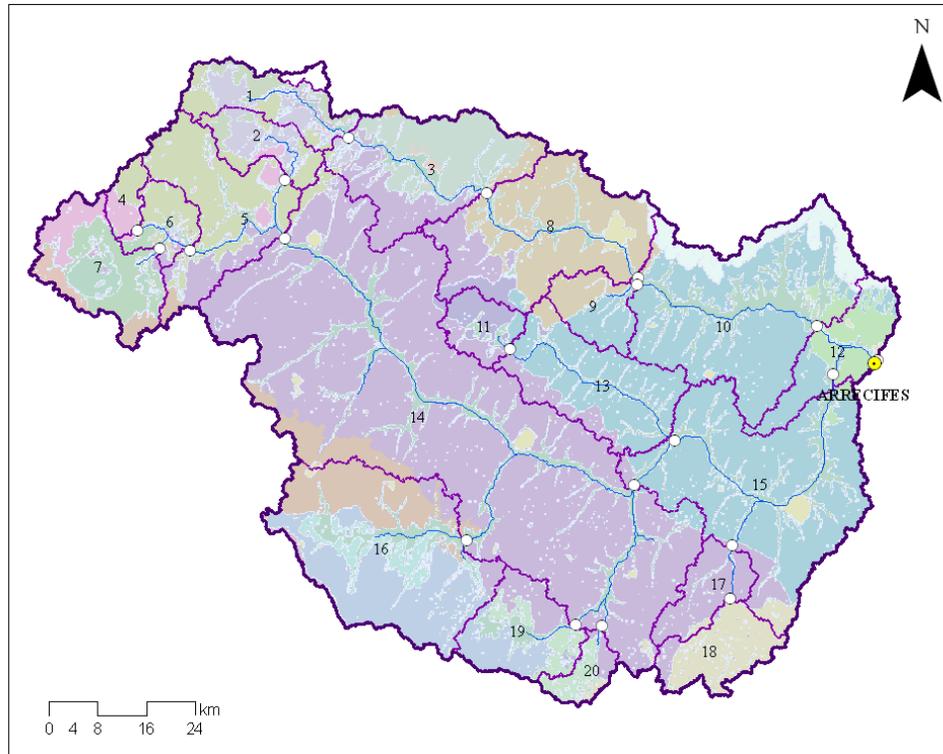


Figura 5. 11. Mapa de subcuencas, outlets y cierre de cuenca.

Tabla 5. 3. Principales parámetros de las subcuencas del río Arrecifes.

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Elevación (m snm)	Perímetro (km)	Pendiente (m/m)	HRUs
1	209,3	94,0	36,5	0,00068	21
2	142,0	93,2	29,3	0,00065	24
3	476,3	81,6	39,0	0,00061	20
4	61,8	102,9	15,1	0,00053	10
5	411,4	93,6	38,5	0,00070	21
6	110,5	95,5	17,3	0,00116	20
7	304,5	100,4	31,5	0,00051	17
8	594,5	74,9	51,2	0,00070	19
9	137,3	72,8	21,9	0,00137	15
10	818,2	61,7	50,7	0,00095	15
11	114,4	81,0	17,1	0,00047	17
12	221,5	48,6	32,5	0,00151	21
13	396,0	72,6	43,9	0,00075	14
14	2.463,8	77,0	106,1	0,00046	11
15	861,3	58,8	67,3	0,00056	12
16	745,2	80,2	45,5	0,00068	23
17	146,0	66,3	26,2	0,00091	9
18	184,7	70,1	23,3	0,00060	9
19	245,3	73,5	28,1	0,00064	21
20	79,0	71,0	22,6	0,00071	18

## Capítulo 5

## 5.2.2. Evaluación de la performance del modelo

## 5.2.2.1. Calibración y análisis de sensibilidad

En la Tabla 5.4 se pueden ver los parámetros seleccionados para la calibración en base a los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad absoluto (on-at-a-time).

Tabla 5. 4. Parámetros seleccionados para la calibración del modelo.

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
<b>Evapotranspiración potencial y actual</b>	
ESCO (v <sub>_</sub> )	Factor de compensación para la evaporación del suelo (fracción).
EPCO (v <sub>_</sub> )	Factor de compensación para la cantidad de agua captada por las plantas (fracción).
GW_REVAP* (v <sub>_</sub> )	Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días).
REVAPMN* (a <sub>_</sub> )	Umbral de la profundidad de agua en el acuífero superficial para revaporizar o percolar (mm).
<b>Volumen de escorrentía superficial y tiempo de concentración</b>	
CNCOEF (v <sub>_</sub> )	Coefficiente para la CN diaria cuando su cálculo depende de la evapotranspiración de las plantas (n/a).
SURLAG (v <sub>_</sub> )	Coefficiente de retardo de la escorrentía superficial, relacionado al tiempo de concentración (n/a)
CN2 (r <sub>_</sub> )	Número de Curva inicial para la condición de humedad II (n/a)
SLSUBBSN (r <sub>_</sub> )	Longitud de la pendiente media (m).
OV_N (r <sub>_</sub> )	Coefficiente de Manning's n de la superficie terrestre (n/a).
<b>Transmisión de las pérdidas de la escorrentía superficial</b>	
CH_K (1) ** (v <sub>_</sub> )	Conductividad hidráulica efectiva de los canales tributarios aluviales (mm/h).
<b>Contenido de agua en el suelo</b>	
SOL_BD (r <sub>_</sub> )	Densidad aparente del suelo (gr/cm <sup>3</sup> ).
SOL_AWC (r <sub>_</sub> )	Disponibilidad de agua en el suelo (mm H <sub>2</sub> O /mm).
SOL_K (r <sub>_</sub> )	Conductividad hidráulica saturada en el suelo (mm/h).
FFCB (v <sub>_</sub> )	Contenido inicial de agua almacenada en el suelo expresada como fracción de la capacidad de campo del suelo (fracción).

## Capítulo 5

(Continuación Tabla 5.4)

<b>Flujo lateral</b>	
LAT_TTIME (v_)	Tiempo de viaje del flujo lateral (días).
<b>Agua subterránea y flujo base (* parámetros incluidos en este proceso)</b>	
GW_DELAY (a_)	Tiempo de retardo del flujo subterráneo (días).
ALPHA_BF (v_)	Factor alfa de recesión del flujo base (días).
GWQMN (a_)	Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial para que ocurra flujo de retorno (mm).
RCHRG_DP (a_)	Coefficiente de percolación al acuífero profundo (fracción).
<b>Ruteo del volumen de agua en canal (** parámetros incluidos en este proceso)</b>	
TRNSRCH (v_)	Fracción de la transmisión de pérdidas desde el canal al acuífero profundo (fracción).
EVERCH (v_)	Factor de ajuste en la evaporación de los cauces (n/a).
CH_N (1) (v_)	Coefficiente de Manning's para canales tributarios (n/a).
CH_N (2) (v_)	Coefficiente de Manning's para canales principales (n/a).
CH_K (2) (v_)	Conductividad hidráulica efectiva para canales principales (mm/h).
ALPHA_BNK (v_)	Factor de recesión del flujo base en los bancos de almacenamiento (días).

Posteriormente, se realizó la calibración mediante el algoritmo SUFI-2. En la tabla 5.5 se muestran los rangos de variación de los parámetros (inicial y final) y el valor de variación finalmente ajustado para cada parámetro a paso mensual. Estos valores, posteriormente modifican a los parámetros del modelo según el tipo de cambio que se haya seleccionado en la calibración (a-, v-, r.). Respecto a la calibración diaria, la primera iteración dio como resultado una diferencia importante entre el caudal diario observado y simulado, determinando valores de  $R^2$  (0,36) y NSE (0,34) relativamente bajos. Para llegar a la optimización final de los parámetros, se necesitaron 41 iteraciones de 100 simulaciones cada una, ejecutándose un total de 4.100 simulaciones. Como resultado final se obtuvo un  $R^2$  de 0,59 y NSE de 0,55. Por otro lado, la calibración mensual dio mejores

## Capítulo 5

resultados. Así, en la primera iteración se obtuvo un  $R^2$  de 0,52 y un NSE de 0,41. Para llegar a la optimización final de los parámetros se necesitaron 8 iteraciones con 100 simulaciones cada una, ejecutándose un total de 800 simulaciones. Como resultado final de la calibración se obtuvo un  $R^2$  de 0,69 y NSE de 0,67. En la Figura 5.12 se muestra la evolución del caudal mensual observado y simulado para todo el periodo de calibración considerado.

Tabla 5. 5. Rango (inicial y final) y ajuste final del factor de variación de cada parámetro seleccionado en el proceso de calibración con SUFI-2.

<b>Variable</b>	<b>Método var.</b>	<b>Rango inicial</b>	<b>Rango final</b>	<b>Val. ajustado</b>
ESCO	(v_)	0,8 - 1	0,91 - 0,93	0,92
EPCO	(v_)	0,8 - 1	0,79 - 0,82	0,79
GW_REVAP	(v_)	0,01 - 0,2	0,089 - 0,099	0,095
REVAPMN	(a_)	0 - 300	152 - 208	197
CNCOEF	(v_)	0,5 - 0,8	0,56 - 0,58	0,58
SURLAG	(v_)	1 - 5	0,10 - 0,86	0,50
CN2	(r_)	-0,1 - 0,1	-0,109 - -0,086	-0,097
SLSUBBSN	(r_)	0 - 0,3	0,23 - 0,29	0,27
OV_N	(r_)	0,01 - 0,04	0,022 - 0,025	0,023
CH_K (1)	(v_)	1 - 5	35 - 38	35,9
SOL_BD	(r_)	-0,08 - 0	-0,013 - 0,000	-0,045
SOL_AWC	(r_)	-0,05 - 0,05	-0,051 - -0,045	-0,010
SOL_K	(r_)	0 - 0,03	0,006 - 0,009	0,007
FFCB	(v_)	0,7 - 0,9	0,77 - 0,81	0,78
LAT_TTIME	(v_)	80 - 120	71,5 - 76,3	75,6
GW_DELAY	(a_)	0 - 60	36,0 - 46,5	42,3
ALPHA_BF	(v_)	0 - 0,06	0,001 - 0,007	0,006
GWQMN	(a_)	50 - 70	30,7 - 36,9	35,4
RCHRG_DP	(a_)	-0,02 - 0,02	0,046 - 0,054	0,049
TRNSRCH	(v_)	0,3 - 0,8	0,43 - 0,48	0,48
EVERCH	(v_)	0,3 - 0,8	0,65 - 0,73	0,69
CH_N (1)	(v_)	0,01 - 0,05	0,017 - 0,026	0,020
CH_N (2)	(v_)	0,01 - 0,08	0,016 - 0,030	0,026
CH_K (2)	(v_)	50 - 125	115 - 118	115
ALPHA_BNK	(v_)	0,01 - 0,5	0,16 - 0,23	0,18

## Capítulo 5

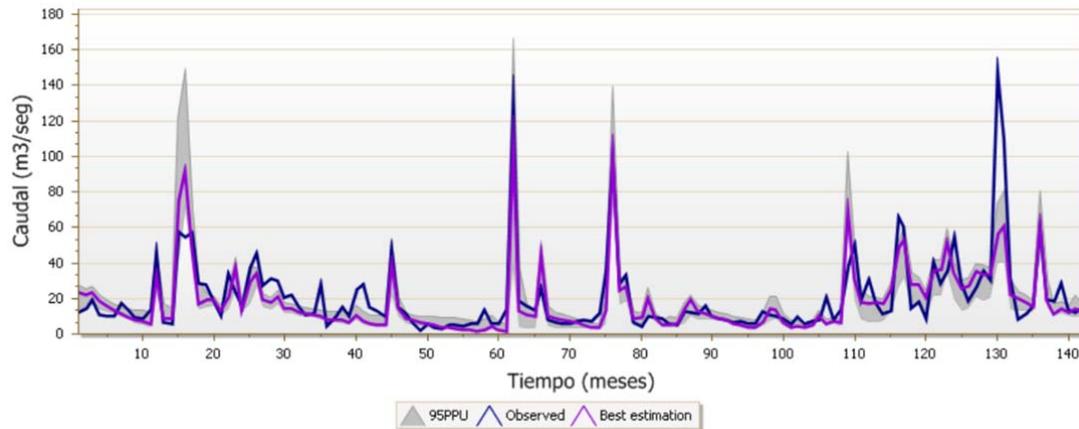


Figura 5. 12. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período calibrado.

La bondad del ajuste, de la calibración mensual, se evaluó mediante la medida de la incertidumbre (Figura 5.12). En referencia a los factores P y R (evalúan la incertidumbre del modelo), se obtuvo un valor 0,70 para P, indicando que el 70 % ( $0,70 \cdot 100$ ) de los datos observados están acotados dentro del 95PPU. Por otro lado, el factor R definió un valor de 0,54, considerándose como aceptable.

La evaluación del grado de sensibilidad global de los parámetros mostró que los 6 primeros parámetros rankeados, a saber: SURLAG, CH\_N2, TRNSRCH, OV\_N, CN2, ALPHA\_BF tienen mayor grado de sensibilidad. En la Tabla 5.6 se muestran el valor de t-stat (medida del grado de sensibilidad) y de P (significancia de la sensibilidad, considerando los valores cercanos a ceros más significativos), así como el ranking de sensibilidad global de los parámetros seleccionados para la calibración mensual.

Asimismo, en el anexo CD-Rom se encuentran las bases de datos del modelo SWAT con los parámetros iniciales y los parámetros luego de calibrar.

## Capítulo 5

Tabla 5. 6. t-Stat, P y ranking de cada parámetro obtenidos en el proceso de análisis de sensibilidad global con SUFI-2.

Variable	t-Stat	P	Ranking
6:V__SURLAG.bsn	3,95	0,00	1
23:V__CH_N2.rte	3,19	0,00	2
20:V__TRNSRCH.bsn	2,64	0,01	3
9:R__OV_N.hru	-2,08	0,04	4
7:R__CN2.mgt	1,90	0,06	5
17:V__ALPHA_BF.gw	1,70	0,09	6
15:V__LAT_TTIME.hru	-1,56	0,12	7
3:V__GW_REVAP.gw	1,46	0,15	8
2:V__ESCO.hru	-1,19	0,24	9
24:V__CH_K2.rte	-1,07	0,29	10
14:V__FFCB.bsn	-1,06	0,29	11
1:V__EPCO.hru	1,04	0,30	12
10:V__CH_K1.sub	-1,03	0,31	13
21:V__EVRCH.bsn	0,92	0,36	14
12:R__SOL_BD(..).sol	-0,89	0,38	15
4:A__REVAPMN.gw	-0,78	0,44	16
8:R__SLSUBBSN.hru	-0,70	0,49	17
5:V__CNCOEF.bsn	0,66	0,51	18
16:A__GW_DELAY.gw	-0,60	0,55	19
19:A__RCHRG_DP.gw	0,48	0,63	20
22:V__CH_N1.sub	0,28	0,78	21
13:R__SOL_K(..).sol	-0,26	0,80	22
18:A__GWQMN.gw	-0,12	0,90	23
11:R__SOL_AWC(..).sol	0,08	0,94	24
25:V__ALPHA_BNK.rte	-0,04	0,97	25

## 5.2.2.2. Validación

La validación a paso diario, dio como resultado valores relativamente bajos de  $R^2$  0,55 y NSE 0,46. Sin embargo la validación mensual definió un valor de  $R^2$  0,75 y de NSE 0,72 (Figura 5.13). Estos valores muestran que en estos años, el modelo a paso mensual, al igual que en la calibración se ajusta apropiadamente al sistema físico planteado. Respecto a los factores P y R, se obtuvo un valor 0,77 para P, indicando que el 77 % ( $0,77*100$ ) de los

## Capítulo 5

datos observados están acotados dentro del 99PPU. Por otro lado, el factor R definió un valor de 0,55, considerándose aceptable.

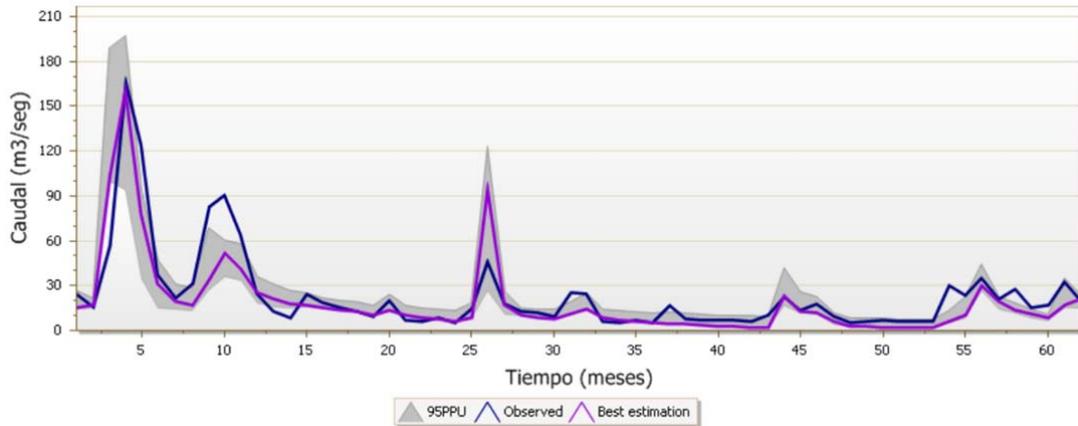
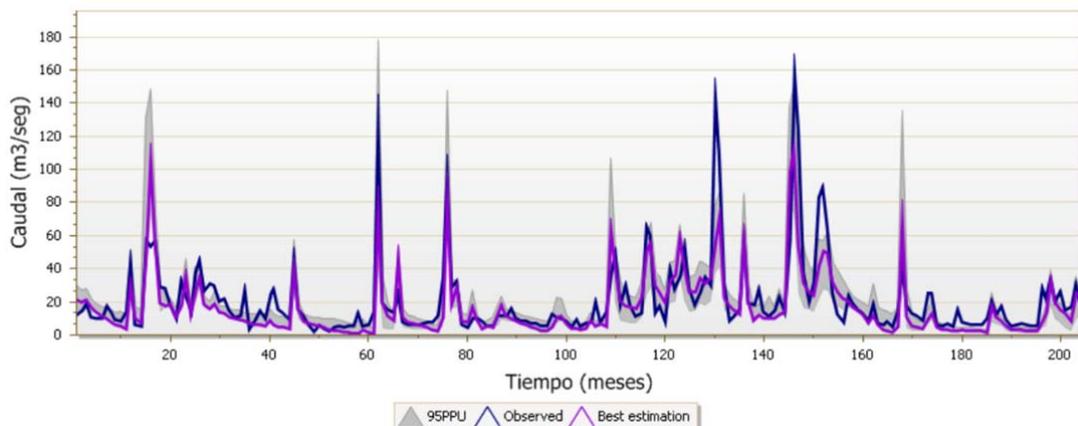


Figura 5. 13. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período validado.

### 5.2.3. Obtención de los valores de humedad de suelo simulados

Luego de calibrar y validar el modelo, se extrajeron los valores de humedad de suelo simulada (HSS) de cada subcuenca. Como los resultados obtenidos en la calibración y validación fueron mejores a escala temporal mensual, se consideró el mismo paso de tiempo para extraer los resultados de HSS. Para ello, se corrió nuevamente el modelo considerando el periodo completo (1979-1998), así como la última iteración ajustada durante el proceso de calibración y validación. Los valores de las funciones objetivos mostraron un  $R^2$  de 0,68 y un NSE de 0,65 (Figura 5.14). En tanto que los factores de incertidumbre fueron P (0,68) y R (0,56).



## Capítulo 5

Figura 5. 14. Evolución del caudal mensual observado y simulado en el período de uso.

Los datos de contenido de agua en el suelo *soil water* (SW), se extrajeron de los archivos de salida *tables out* (.sub) para cada una de las subcuencas, obteniéndose de este modo la HSS (Anexo 4).

En la Figura 5.15 se muestra a modo de ejemplo la distribución espacial de la HSS. En dicha figura se compara para un mismo mes dos situaciones distintas respecto al contenido de agua en el perfil del suelo. Se trata del mes de febrero de 1984 durante el cual se registraron precipitaciones abundantes; y del mes de febrero de 1985 en el que, por el contrario, se determinó déficit hídrico, debido a las bajas precipitaciones que se registraron.

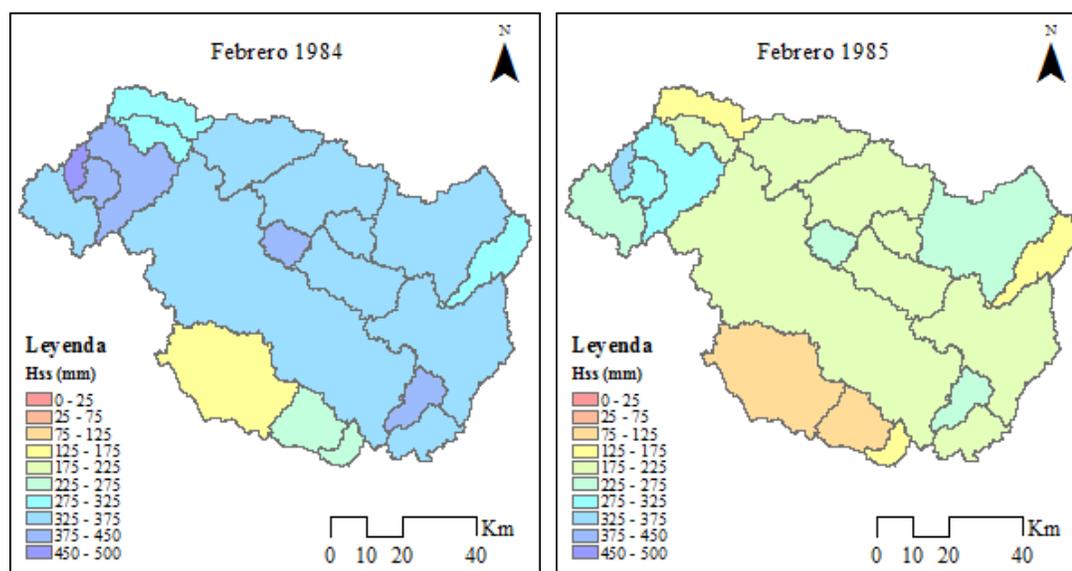


Figura 5. 15. Distribución espacial de la HSS dentro de la cuenca (en lámina de agua).

### 5.3. Índice de precipitación estandarizado

En la Tabla 5.7 se muestra la frecuencia de eventos, en cada categoría de severidad y de escala temporal. Se observa que la menor frecuencia se encuentra en los casos de déficit hídrico categorizado como “extremadamente seco”. A este respecto, a nivel mensual se detectaron 4 y 6 eventos para las estaciones NH0145 y NH0453, respectivamente. De ellos, el primer evento (julio de 1983) fue el de mayor duración (se

## Capítulo 5

llegó a detectar incluso con el SPI 6). Otros dos eventos (diciembre de 1986 y noviembre de 1994), se produjeron durante el periodo vegetativo activo de los cultivos.

Tabla 5. 7. Frecuencia de casos de eventos por categoría para el periodo 1979-1998.

SPI	Categoría	NH0145			NH0453		
		SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 1	SPI 3	SPI 6
-3 a -2	Extremadamente seco	4	1	3	6	3	0
-1,5	Muy seco	8	13	12	6	9	11
-1	Moderadamente seco	26	25	21	23	25	21
-0,5	Ligeramente seco	26	38	37	27	29	32
0	Normal	82	72	68	80	74	86
0,5	Ligeramente húmedo	33	23	32	35	38	27
1	Moderadamente húmedo	13	20	23	20	17	19
1,5	Muy húmedo	5	6	6	2	8	7
2 a 3	Extremadamente húmedo	7	6	2	5	1	1

Para las sequías severas, o eventos “muy secos”, a escala mensual (SPI 1) se registraron 8 y 6 casos para las estaciones NH0145 y NH0453, respectivamente. No obstante, en las escalas temporales mayores (SPI 3 y SPI 6) se observó un aumento de la frecuencia. Las sequías moderadas, o eventos “moderadamente secos”, presentan altas frecuencias en sus tres escalas de tiempo, habiéndose observado más de 20 casos. Aproximadamente la mitad de este tipo de sequías se produjeron en algún momento de la etapa de crecimiento de los cultivos. Por otro lado, aquéllas detectadas con el SPI de 3 y 6 meses afectaron alguna etapa del periodo vegetativo. En relación con las anteriores, destacan los eventos ocurridos durante los años 1983, 1985, 1994, 1995, 1996 y 1998.

En las Figuras 5.16 y 5.17 se muestra la evolución del SPI en el periodo de estudio (1982-1998), mientras que en rojo se destacan los promedios móviles con un intervalo de 12 meses para el SPI 3. Se observa que las sequías extremas y severas, con una duración superior a 3 meses, se presentan cíclicamente. En este sentido, entre 1982 y 1998 se pueden observar dos ciclos de 5 (83/88) y 6 (89/95) años.

## Capítulo 5

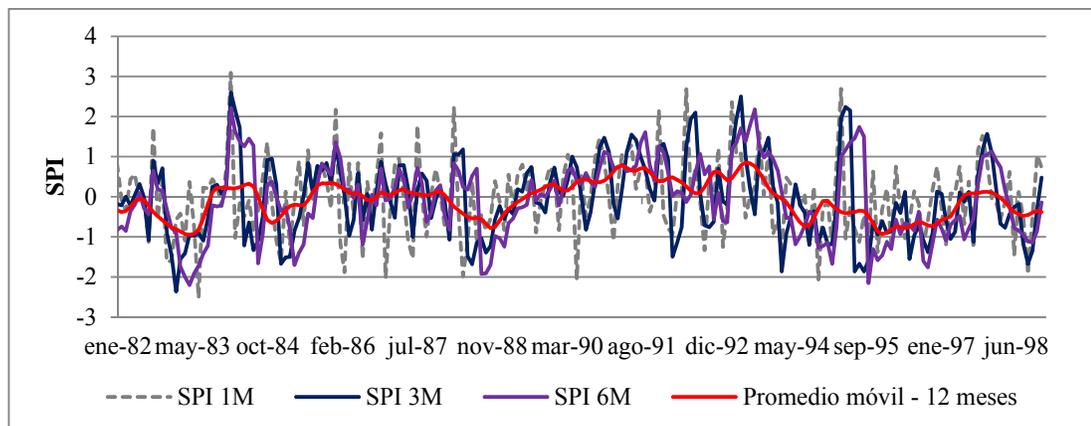


Figura 5. 16. Evolución temporal del índice de precipitación estandarizado y promedios móviles del SPI 3 durante 1982-1998 calculado con datos de la estación meteorológica NH0145.

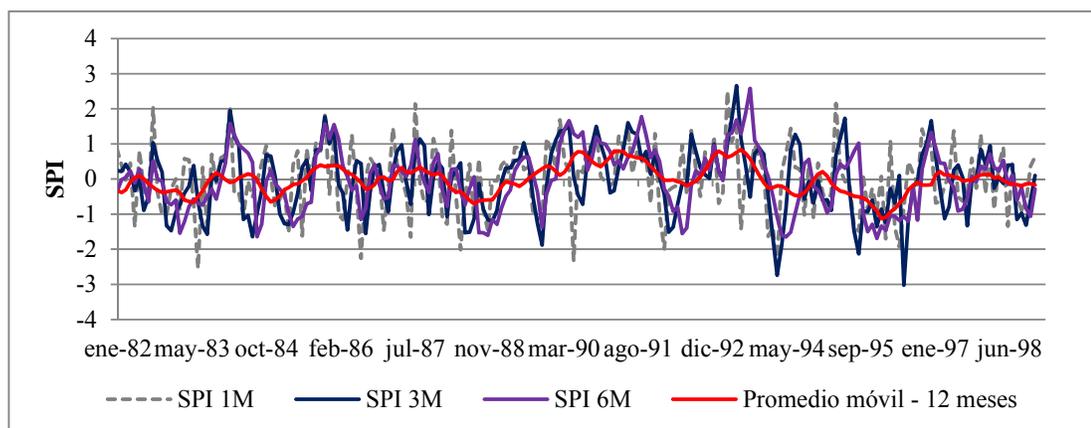


Figura 5. 17. Evolución temporal del índice de precipitación estandarizado y promedios móviles del SPI 3 durante 1982-1998 calculado con datos de la estación meteorológica NH0453.

## 5.4. Índice verde

### 5.4.1 Análisis espacial

En la Figura 5.18 (a, b) se muestran dos mapas de NDVI (febrero 1984 – febrero 1985) en los que, por un lado, se observa la distribución del índice en el área de estudio y, por el otro, para un mismo mes se realiza una comparativa de dos situaciones distintas (un mes de excesos y un mes de sequía respectivamente). A este respecto, los valores del índice tal y como fueron calculados (ver Capítulo 4) no lograron manifestar diferencias

## Capítulo 5

substanciales entre las dos situaciones. Como resultado, se decidió calcular la anomalía del índice (aNDVI) y examinar la variación espacial del índice dentro de la cuenca.

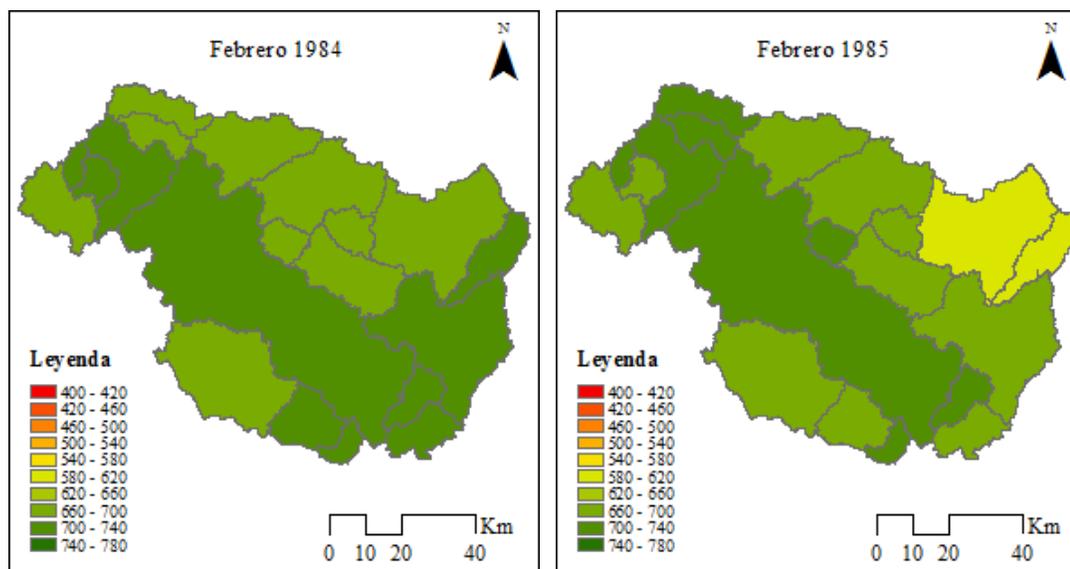


Figura 5. 18. Distribución espacial del NDVI dentro de la cuenca.

Para analizar la variación espacial de la aNDVI se aplicó un método de regionalización, en el que se combinaron dos métodos: análisis de componentes principales (ACP) y algoritmo de agrupamiento no-jerárquico de k-means. Mediante el criterio de corte seleccionado, se determinó que las dos primeras componentes explicaban el 84 % de la varianza (Tabla 5.8). Seguidamente, se graficaron los factores de peso CP1 versus CP2, con el propósito de ver el agrupamiento inicial obtenido (Figura 5.19). En este gráfico se observa que los datos se separan en dos grandes grupos.

Tabla 5. 8. Autovalores y porcentajes de varianza explicados y acumulados para las primeras 2 CP.

<i>CP</i>	<i>Autovalor</i>	<i>Varianza exp. (%)</i>	<i>Varianza acum. (%)</i>
1	15,54	77,70	77,70
2	1,23	6,18	83,89

## Capítulo 5

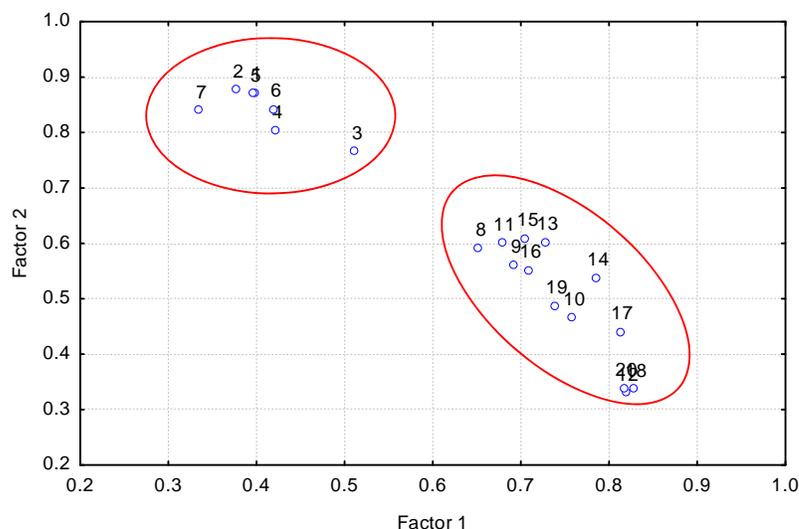


Figura 5. 19. Gráfico de dispersión para los factores de peso 1 y 2.

El método de k-means se aplicó con las dos primeras componentes rotadas. Para determinar el número óptimo de grupos  $k$ , se empleó el test denominado pseudo-F. En la Figura 5.20 se muestra la variación del estadístico en función del número de grupos. El máximo representa el número óptimo de clúster, siendo en este caso  $k=4$ .

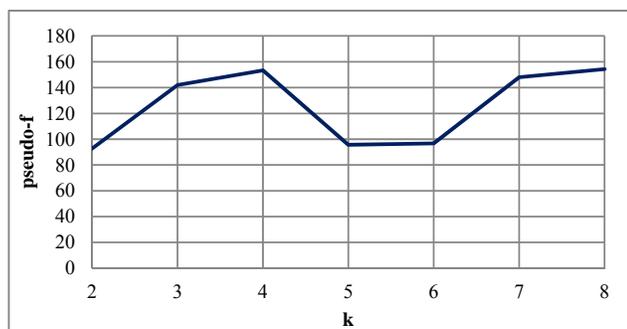


Figura 5. 20. Variación de pseudo-F en función del número de grupos  $k$ .

Una vez obtenido el número de grupos óptimo, se aplicó el método k-means para determinar la composición final de cada grupo (Figura 5.21). En cada cluster resultaron las siguientes subcuencas: grupo 1 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7), grupo 2 (8, 9, 11, 13, 15, 16), grupo 3 (10, 14, 17, 19) y grupo 4 (12, 18, 20). En general, el agrupamiento encontrado se corresponde principalmente con los tipos de suelos existentes. En este sentido, aunque en la mayoría de las subcuencas dominan los *Argiudoles típicos*, la presencia de otros tipos de

## Capítulo 5

suelo, de connotación local, logran una respuesta diferente en la vegetación. Así, en el cluster 4, compuesto por las subcuencas 12, 18 y 20 aparece un porcentaje de suelos de régimen acuico, que es característico de suelos hidromorfos y con drenaje deficiente. Asimismo se observó que, al relacionar la superficie de las subcuencas con el número de HRUs, existe una relación entre el área de las subcuencas y la homogeneidad respecto del uso del suelo. Por último, se encontró que el grupo 1 fue el más homogéneo (tiene menor tipo de usos de suelo por superficie), mientras que el grupo de mayor variabilidad fue el 3.

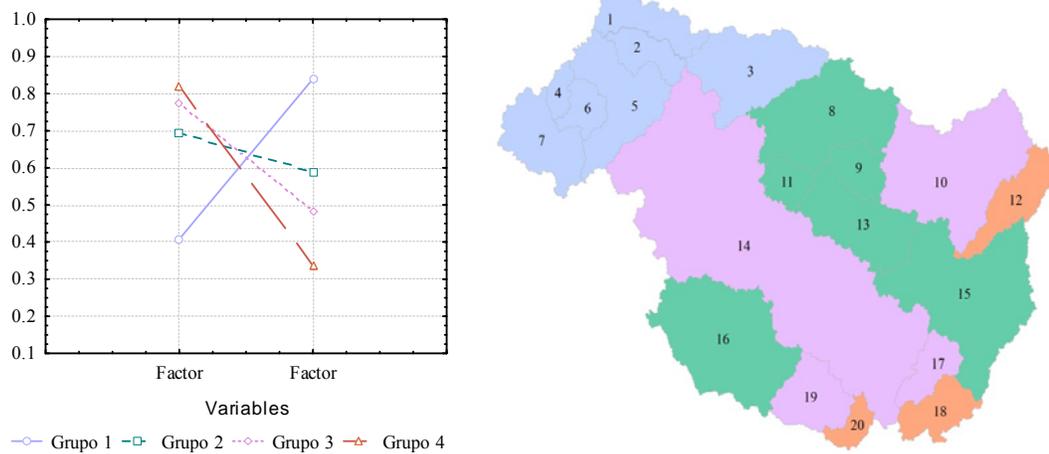


Figura 5. 21. A la izquierda se puede observar la media graficada obtenida en cada grupo. Mientras que a la derecha se puede ver la distribución espacial de los grupos dentro de la cuenca.

### 5.4.2 Análisis temporal

Para analizar la variabilidad temporal se correlacionó la aNDVI con el SPI 1 y el SPI 3. El análisis de las series temporales a nivel de subcuenca y utilizando el SPI 1, dio correlaciones poco significativas. Sin embargo, con el SPI 3 se observó un leve incremento en las correlaciones (Figura 5.22 a y b) que indica la existencia de un desfase temporal entre los índices. Como resultado, se puede concluir que los cultivos responden a eventos de déficit o exceso mayores de 1 mes.

## Capítulo 5

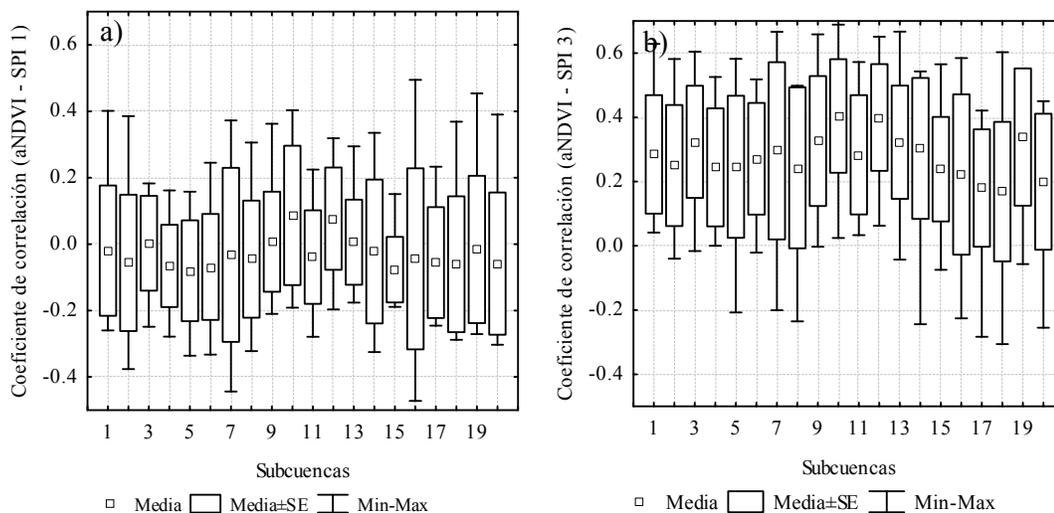


Figura 5. 22. Correlación entre aNDVI y SPI a nivel de subcuenca.

A nivel mensual, se estudiaron las relaciones entre la aNDVI (sin *lag* y con un *lag* de 1 y 2 meses) y el SPI 1 y SPI 3. Los gráficos resultantes se pueden ver en la Figura 5.23 (a, b, c, d, e, f). Los mismos muestran que en todos los casos la correlación varía significativamente entre meses. También se observa que las correlaciones más bajas se hallaron con el SPI 1 y que las más altas se encontraron con el SPI 3, particularmente cuando se relaciona la aNDVI y el SPI 3 (Figura 5.23 d).

A modo de conclusión, cabe señalar que el SPI 3 es el índice óptimo para el estudio de sequías agrícolas en la cuenca del río Arrecifes. Como en el caso anterior nuevamente los resultados indican que, por un lado, los cultivos responden a cambios en la precipitación de al menos 1 mes. Los valores más altos se localizaron los meses de septiembre, noviembre y abril, que se corresponden con los estadios iniciales de crecimiento de los cultivos de invierno y con el estadio de germinación de los cultivos de verano de segunda, y la con fase de crecimiento y madurez de los cultivos de verano.

Capítulo 5

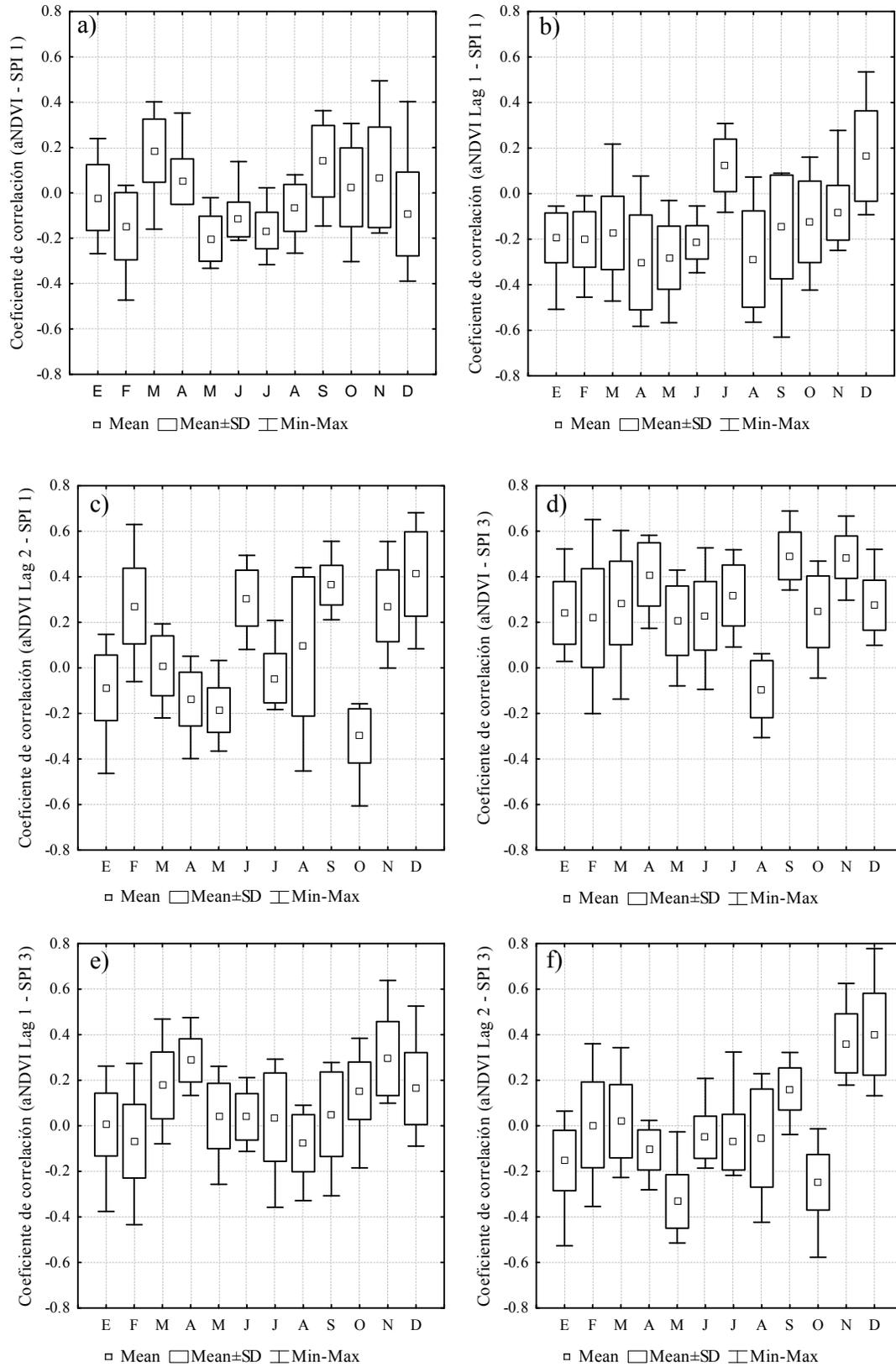


Figura 5. 23. Correlación entre aNDVI y SPI a nivel mensual.

Capítulo 5

5.4.3 Análisis espacio-temporal por grupo

En último lugar se estudiaron las correlaciones entre la aNDVI y el SPI 3 para los cuatros grupos obtenidos mediante el método de regionalización. En la Figura 5.24 (a, b, c, d) se muestran los gráficos resultantes para cada grupo. Considerando al conjunto de grupos en forma global, se observa que la distribución de los puntos sigue un patrón similar en los gráficos de los grupos 2, 3 y 4.

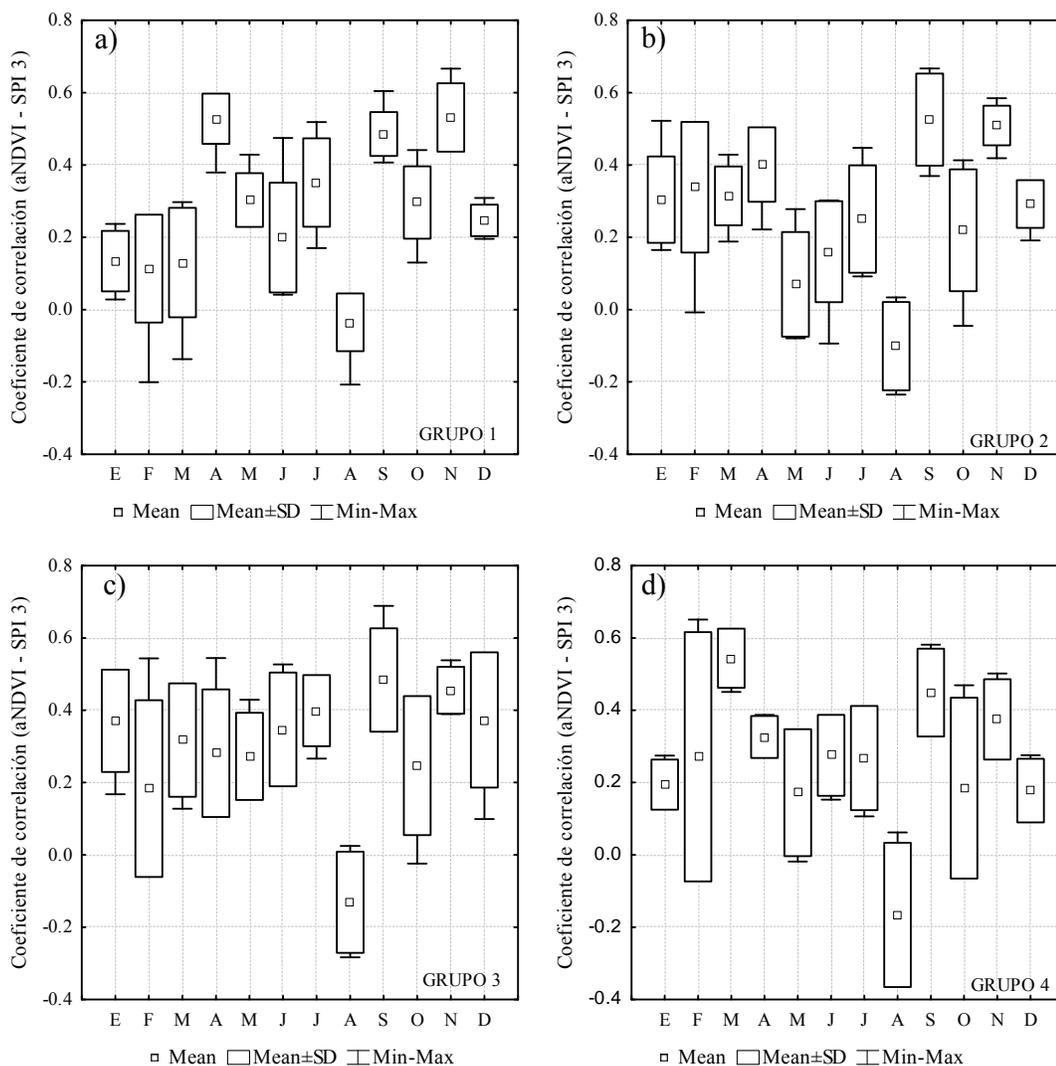


Figura 5. 24. Correlación entre aNDVI (lag 1) y SPI 3 a nivel mensual por grupo.

Los grupos 2 y 3 son los que muestran menor variabilidad, mientras que los grupo 1 y 4 presenta la mayor variación. El grupo 1 presenta las correlaciones más altas en los meses de septiembre, noviembre y abril, así como las correlaciones más bajas en los otros

## Capítulo 5

meses de verano respecto de los demás grupos. Por otro lado, el grupo 4 mantiene correlaciones más bajas y presenta valores más altos durante el mes de septiembre y marzo.

### 5.5. Correlación del SPI y NDVI con la HSS

#### 5.5.1 Correlación del SPI con la aHSS

La correlación entre la aHSS-SPI se estudió a nivel mensual. En la Figura 5.25 (a, b, c, d) se muestran las correlaciones encontradas entre la aHSS (con *lag* 0 y 1) y el SPI 1 y SPI 3. Tal y como se observa las correlaciones siguen un evidente patrón estacional. La correlación entre aHSS (*lag* 0) y el SPI 1 y SPI 3 mostró valores significativos y con menor variabilidad, en comparación con la obtenida al utilizar la aHSS (*lag* 1), la que presentó valores más bajos y con mayor variabilidad entre meses. De estos resultados se dedujo lo siguiente: i) la relación significativa y positiva entre la aHSS y el SPI muestra que este índice puede ser utilizado para evaluar el funcionamiento del modelo como predictor de la humedad del suelo; ii) la menor correlación entre el SPI 1/SPI 3 y la aHSS (con *lag* 1) indica que hay una relación directa entre la precipitación y la humedad del suelo simulada. Así, si existiera un desfase entre los índices (SPI y aHSS), éste debería ser menor al paso de tiempo considerado (Figura 5.25 b y d); iii) la existencia de correlación significativa entre aHSS y SPI 3 muestra que hay una dependencia de la precipitación sobre la humedad del suelo y un efecto acumulativo en el tiempo (Figura 5.25 c).

Capítulo 5

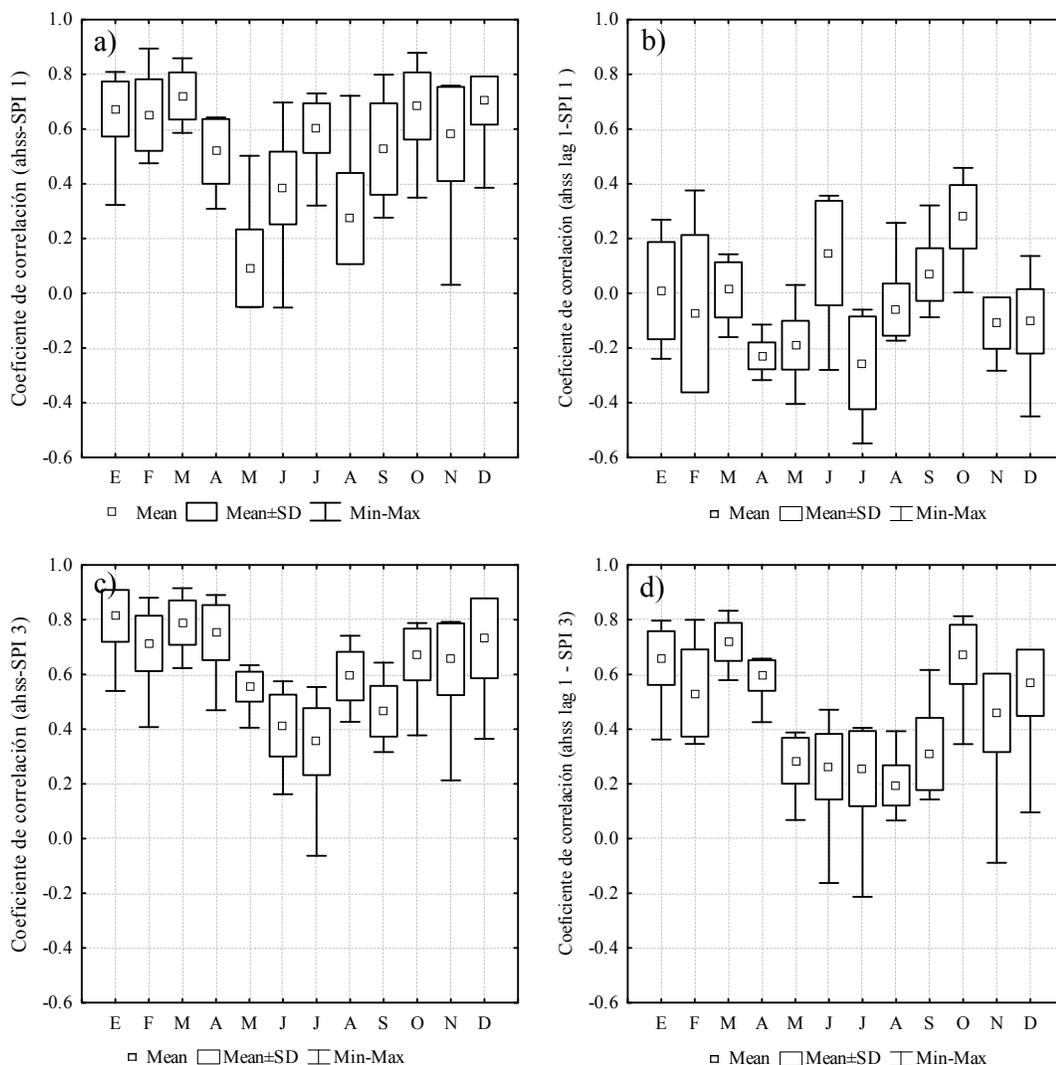


Figura 5. 25. Correlación entre aHSS y SPI a nivel mensual.

5.5.2 Correlación de la aNDVI con la aHSS

La correlación entre aHSS-aNDVI se estudió a nivel mensual. En la Figura 5.26 (a, b, c) se muestran las correlaciones encontradas entre aHSS y aNDVI (con *lag* 0, 1 y 2). Tal como se observó con el SPI, las correlaciones obtenidas siguen un patrón estacional. En general, las correlaciones estimadas fueron poco significativas, siendo los valores más altos los correspondientes con aNDVI (*lag* 1) (Figura 5.26 b). Además, los resultados obtenidos se asemejan a los encontrados para aNDVI y SPI. Como consecuencia, se deduce que el comportamiento de la aNDVI respecto a otros índices de sequías o humedad del suelo podría estar afectado por circunstancias ambientales parecidas.

## Capítulo 5

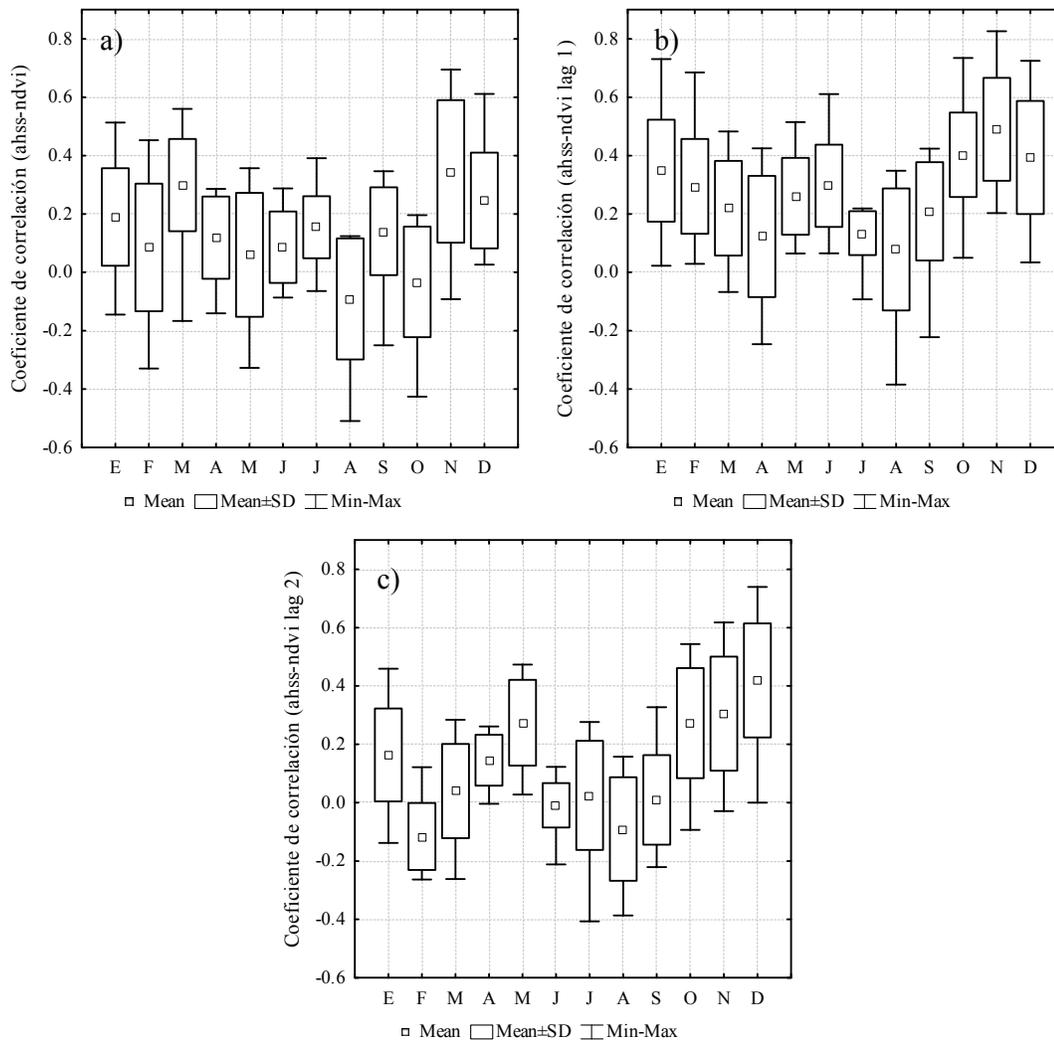


Figura 5. 26. Correlación entre aHSS y aNDVI a nivel mensual.

Además, se encontró que: i) las correlaciones fueron poco significativas en todas las relaciones analizadas. En consecuencia, con este índice no se logró validar, el funcionamiento del modelo como predictor de la humedad del suelo; ii) las correlaciones más altas correspondieron a los meses comprendidos entre octubre y diciembre (momento en que los cultivos de invierno se encuentran en etapa de madurez y cosecha, mientras que los cultivos de verano están en fase de crecimiento, y/o siembra de los cultivos de segunda). Por el contrario, las correlaciones menos significativas se observaron entre los meses de abril y septiembre (momento de la madurez y cosecha de los cultivos de verano, siembra y/o etapa de crecimiento de los cultivos de invierno).

Capítulo 5

5.5.3 Análisis espacio-temporal por grupo

Para observar el comportamiento de las correlaciones de manera regionalizada, se estudió la correlación entre la aHSS y la aNDVI (*lag* 1) en los cuatros grupos obtenidos mediante el método de regionalización anteriormente utilizado. En la Figura 5.27 (a, b, c, d) se pueden ver los gráficos resultantes para cada grupo. El grupo 2 es el que mostró menor variabilidad (Figura 5.27 b), mientras que el grupo 4 (Figura 5.27 d) es el que presentó la mayor variación. En general, las correlaciones más altas se produjeron entre los meses de octubre y febrero, mientras que las correlaciones más bajas se produjeron entre marzo y septiembre.

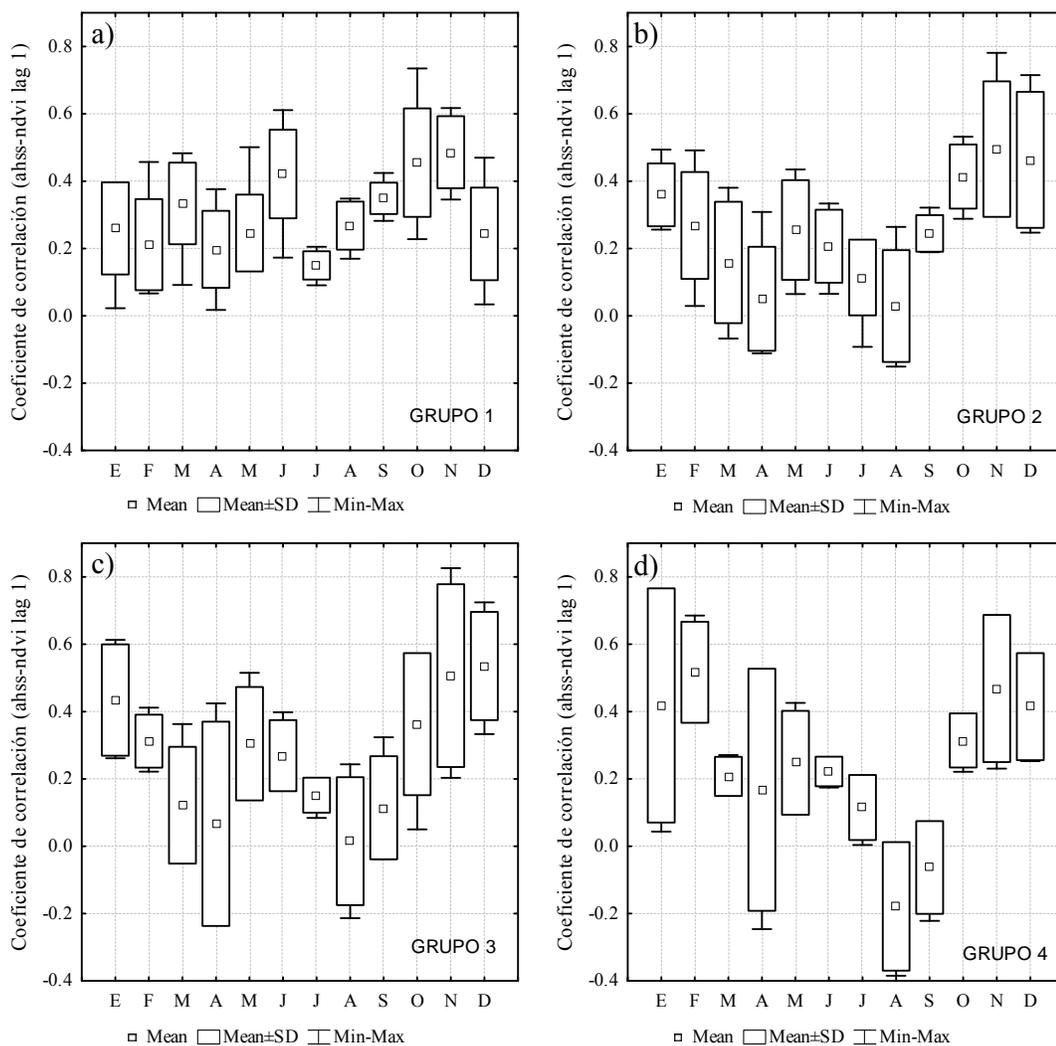


Figura 5. 27. Correlación entre aHSS y aNDVI (lag 1) a nivel mensual por grupo.

## Capítulo 5

Considerando al conjunto de grupos en forma global, se observa que la distribución de los puntos siguió un patrón similar en todos los grupos, exceptuando el grupo 1 (Figura 5.27 c), el cual en algunos meses (diciembre a abril, agosto) muestra correlaciones más bajas cuando los otros tienen valores más altos y viceversa.

## Capítulo 6

### Capítulo 6 : Discusión

#### 6.1. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos permiten afirmar que gran parte de los objetivos planteados se han cumplido. Así, se logró desarrollar el registro a largo plazo de la humedad del suelo aplicando el modelo hidrológico SWAT. Además, se realizó el análisis espacio-temporal de los índices SPI y NDVI para detectar periodos y áreas que sufrieron sequía, y se analizó la correlación existente entre la humedad de suelo simulada y estos índices. En lo que al objetivo general se refiere “*Evaluar a nivel de cuenca la aptitud de SWAT, utilizado junto a otros indicadores de sequía, como herramienta para la detección y caracterización de sequías agrícolas en la región pampeana*” se puede afirmar que se ha cumplido, aunque deberán revisarse algunos aspectos metodológicos a futuro.

Por otra parte, cabe destacar, que esta tesis es novedosa en el contexto de la Argentina, en cuanto es la primera vez que se utiliza un modelo hidrológico para simular la humedad del suelo y se asocian sus resultados tanto a índices de sequía como índices verdes para el estudio de las sequías. Como resultado, después de haber realizado una extensa revisión bibliográfica, a escala nacional, se puede afirmar que esta tesis aporta una nueva aproximación metodológica para el estudio y monitoreo de las sequías. Sin embargo hay que destacar, tal y como se mostrará en la discusión de los diferentes resultados obtenidos, que para que algunos resultados sean concluyentes se deberá continuar investigando en el futuro.

##### 6.1.1. Modelo SWAT

Respecto de la aplicación del modelo SWAT para el desarrollo de la HSS a largo plazo, se logró calibrar ( $R^2$  0,59 y NSE 0,55) y validar ( $R^2$  0,55 y NSE 0,46) el modelo SWAT a escala temporal diaria. En tanto que a escala mensual se logró calibrar ( $R^2$  0,69 y NSE 0,68) y validar ( $R^2$  0,75 y NSE 0,72). Los valores alcanzados mediante las funciones

## Capítulo 6

objetivos seleccionadas indicaron que el desempeño del modelo a paso diario fue relativamente bajo en su validación, mientras que a paso mensual se consideró muy bueno de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007). Al aplicar el modelo al periodo de estudio completo (1975-1998), utilizando para ello el mismo procedimiento y valores que en la validación, se obtuvieron un  $R^2$  (0,68) y un NSE (0,65). Es decir, valores más bajos, que sin embargo nuevamente mostraron que el modelo funciona en forma satisfactoria. Estos resultados son coherentes con aquéllos obtenidos en otros estudios, de características y cantidad de información disponible similares al aquí presentado, y en los que los investigadores han utilizado con éxito el modelo SWAT (Barrios y Urribari, 2010; Gonzalez, 2011; Jha, 2012; Richard, 2010).

En general, se observó un buen ajuste entre las curvas de caudales observados y simulados. Las mayores desviaciones estuvieron asociadas a las mayores crecidas puesto que el modelo subestimó el caudal. Los caudales medios y mínimos fueron modelados con mayor precisión respecto a la predicción para picos de caudal. Esta respuesta del modelo pudo deberse a que la información mensual fue promediada y a que la mayoría de los fenómenos correspondieron a caudales medios y bajos, mientras los episodios de picos de caudal fueron relativamente escasos. Además, es importante mencionar que una de las limitantes es la falta de información precisa vinculada a estos eventos precisos, que hubieran permitido una mejora en la performance del modelo. Con todo, se considera que los resultados obtenidos fueron satisfactorios teniendo en cuenta la cantidad y la calidad de información disponible en el área de estudio. En este sentido, habría que contar con mejores datos, tanto en términos de cantidad y calidad, y especialmente los correspondientes a datos hidrometeorológicos, para optimizar la fiabilidad de las simulaciones.

Uno de los principales problemas detectados en la aplicación del modelo SWAT es, que al ser un modelo semidistribuido, posee numerosos parámetros que caracterizan la

## Capítulo 6

cuenca y como consecuencia su calibración resulta especialmente compleja. El operador, en base al análisis de sensibilidad, toma sólo un grupo de ellos, aunque podría seleccionar diferentes grupos y así llegar a múltiples soluciones. En esta tesis se seleccionaron 25 parámetros para ser calibrados. De ellos 15 correspondían, tanto a parámetros de los acuíferos como a los cauces principales y secundarios de la cuenca. A este respecto, para estos parámetros no se dispuso de su rango de validez en el contexto de la cuenca. Por consiguiente, estos rangos tuvieron que estimarse a nivel regional mediante bibliografía. Como resultado final de la evaluación de la performance del modelo, se obtuvo el análisis de sensibilidad global. Este análisis mostró que los 6 primeros parámetros rankeados: SURLAG, CH\_N2, TRNSRCH, OV\_N, CN2, ALPHA\_BF son los que tienen mayor grado de sensibilidad. En consecuencia, se consideró deberían ser tenidos en cuenta, especialmente para centrar en ellos los esfuerzos de su caracterización en base a la obtención de medidas de calidad en campo u otras fuentes de información.

Otra limitación observada fue que la calibración se realizó para un solo punto (estación Arrecifes N° HL 4035), el cual se corresponde a la salida de la cuenca. La falta de datos hidrológicos que reflejen, su distribución espacial y temporal, lamentablemente es algo generalizado en las cuencas de Argentina. Esta circunstancia podría, por un lado, forzar a que el ajuste de los parámetros a calibrar se logre a costa de sacrificar los rangos físicos locales de algunos de los parámetros y, por el otro, podría conducir a errores en los cálculos de los diferentes procesos hidrológicos en el resto de las subcuencas. Abaspor *et al.* (2007), luego de modelar múltiples parámetros hidrológicos y de calidad de agua con datos observados en un solo punto, y después de comparar resultados obtenidos con datos medidos en otros puntos, llega a la misma conclusión. De ahí, que recomienden el uso de varios puntos para la calibración o al menos que esta ausencia de puntos se compense con una gran cantidad de datos medidos en un único punto a lo largo del tiempo.

## Capítulo 6

Para realizar la calibración, validación y análisis de incertezas se aplicó la herramienta SWAT-CUP utilizando el método SUFI-2 basado en el coeficiente de Nash (NSE) y  $R^2$ . Esta técnica simplificó enormemente la tarea de calibración, al tiempo que permitió correr el modelo con pocas simulaciones (100) por cada iteración. Además, permitió obtener información muy valiosa respecto a la performance del modelo. Así, se lograron rangos de incertidumbre aceptables con un solo punto de calibración. Sin embargo, tal y como consideran Abaspur *et al.* (2004) y Yang *et al.* (2008) el problema de la aplicación de SUFI-2 para una muestra de datos pequeña (establecida aquí en 100 simulaciones) es que de ese modo se disminuye la capacidad de explorar adecuadamente los parámetros. Si bien, el tiempo computacional, bajó considerablemente al utilizar sólo 100 simulaciones, a la larga, hizo que el proceso fuera más lento de lo esperado, ya que se tuvo que repetir varias veces hasta lograr que los resultados fueran los adecuados.

### 6.1.2. Índices SPI y NDVI

El estudio del análisis espacio-temporal de los índices SPI y NDVI permitió, por un lado, detectar episodios de sequías dentro del periodo (1982-1998) y, por el otro, agrupar subcuencas a partir de la vegetación para estudiar su comportamiento. Así, la aplicación del SPI fue muy útil en la identificación y clasificación de los eventos de sequías. Estos resultados coincidieron con los encontrados por Nuñez *et al.* (2005) y Skansi *et al.* (2006), quienes concluyeron que el índice SPI es adecuado para la identificación y seguimiento de eventos secos y húmedos en la región húmeda argentina. En tanto que, el análisis de los promedios móviles durante el periodo de estudio, mostró que las sequías extremas y severas (importantes en agricultura) identificadas con el SPI 3 podrían llegar a tener un comportamiento cíclico. A este respecto, los resultados no son concluyentes y se enfatiza la importancia de continuar su análisis, abarcando un periodo de estudio más amplio y tratando de incorporar otras estaciones meteorológicas de la región.

## Capítulo 6

El análisis de las correlaciones entre SPI y aNDVI mostraron resultados variables y poco significativos para: SPI 1 vs a NDVI, SPI 1 vs aNDVI (*lag* 2), SPI 3 vs aNDVI (*lag* 2) y manifestaron resultados mejores, en general positivos y significativos para: SPI 1 vs aNDVI (*lag* 1), SPI 3 vs aNDVI y SPI 3 vs aNDVI (*lag* 1). La mejor correlación se logró para el SPI 3 y la aNDVI (*lag* 0). De este resultado se dedujo que el SPI 3 es el índice óptimo para el estudio de sequías sobre los cultivos en la cuenca del río Arrecifes. En este sentido, los cultivos responden a cambios en las precipitaciones, aunque ese cambio no es instantáneo sino que su efecto se acumula. Los resultados obtenidos en esta tesis coinciden con los que se derivaron de Ji y Peters (2003) y Ortiz (2011), quienes encontraron que la correlación más alta se da con el SPI 3. Asimismo, observaron que el impacto del déficit de agua sobre la vegetación es acumulativo. Al mismo tiempo, coincidieron en que la estacionalidad tiene un efecto importante sobre la correlación entre el NDVI y SPI. Análogamente, Jain *et al.* (2010) correlacionaron el SPI (de 1 a 12 meses) con el NDVI y otros índices en tres regiones de India. Ellos encontraron particularmente que los resultados de las correlaciones dependen del efecto de la lluvia sobre la vegetación; el cual a su vez está relacionado con el contenido de humedad del suelo. Es decir, si un suelo mantiene por más tiempo su contenido de agua, el efecto de la falta de lluvia sobre la vegetación será más lento; mientras que si un suelo pierde el agua fácilmente, el déficit hídrico impactará de manera más veloz sobre la vegetación.

Mediante la aplicación de la metodología de regionalización utilizada, se logró agrupar las subcuencas en cuatro *clusters*. El análisis de las correlaciones entre el SPI 3 y la aNDVI (*lag* 0) revelaron que la respuesta de la vegetación depende de las circunstancias ambientales locales. Si bien, es evidente que el comportamiento de la vegetación se encuentra sujeto a numerosas variables, también se sabe que gran parte del mismo obedece a los tipos de suelo. En este sentido, en esta tesis se vincularon los suelos de los grupos con la respuesta de las correlaciones entre aNDVI y SPI tal y como propuso Jain *et al.* (2010),

## Capítulo 6

quienes relacionaron el efecto de la lluvia sobre la vegetación a partir del contenido de humedad del suelo. Como resultado, se encontraron respuestas distintas entre grupos, particularmente los grupos 1 y 4, en los que la principal diferencia entre ellos y respecto de los otros consistió en la composición de sus suelos.

Es decir, aunque la conformación de las series de suelos del grupo 1 corresponde principalmente al *Argiudol típico*, también presentan un porcentaje considerable de suelos formados por complejos indiferenciados y suelos de régimen ácuico, que en su conjunto a veces superan el 15 % de la ocupación, mientras que los suelos del grupo 4, si bien pueden llegar a ser muy profundos, presentan hidromorfismo. Estas circunstancias posiblemente originan que los suelos de ambos grupos conserven agua (mientras que el resto de los grupos de la cuenca estén en situación de sequía agrícola) o tengan excesos de agua (cuando los otros grupos muestren un mejor drenaje del agua). Aun así, no se consiguió demostrar de manera explícita dicha relación y por ello se considera necesario continuar con su estudio.

### 6.1.3. Correlaciones del SPI y NDVI con la HSS

En el estudio de las correlaciones entre los índices y la HSS se encontró, por un lado, correlaciones positivas y significativas al relacionar el SPI y la aHSS y, por el otro, correlaciones bajas e incluso negativas al relacionar aNDVI y aHSS. Asimismo, se observó que existe un fuerte patrón estacional el cual se manifiesta en ambos índices.

En relación a las correlaciones entre aHSS y SPI, los resultados fueron más altos con el SPI 3 ( $>0,6$  entre agosto y mayo) y un poco más bajos y variables con el SPI 1 (aunque  $>0,6$  entre octubre y marzo). De igual modo, Richards *et al.* (2010) obtuvieron resultados similares encontrando correlaciones superiores a 0,7 entre el SPI 1 y SPI 3 y la humedad del suelo en periodos agrícolas similares. Así, señalaron que el SPI es un buen indicador de la disponibilidad de agua en el suelo y que en conjunto es un índice adecuado para el monitoreo de la sequía agrícola. Además, estos autores relacionaron los resultados

## Capítulo 6

obtenidos, tanto con el tipo de vegetación presente como con los cambios estacionales de la precipitación; y con el efecto del tipo de suelo sobre la humedad del suelo. De este modo, encontraron que la disponibilidad de agua en el suelo es dependiente del tipo de suelo y que el cambio espacial del tipo de suelo juega un rol importante en la relación entre el SPI y la humedad del suelo.

Sin embargo, las correlaciones entre el NDVI y la HSS fueron bajas, e incluso en algunos meses llegaron a ser negativas. Los valores más bajos se obtuvieron a fines y principios del ciclo agrícola. Por ello, es importante señalar que las comparaciones deben realizarse únicamente durante el periodo activo de crecimiento de la vegetación. Narasimhan (2004) y Richards *et al.* (2010), correlacionaron los resultados de la HSS con NDVI en diferentes tipos de cultivos y pasturas. Como resultado, concluyeron que es conveniente correlacionar el NDVI únicamente durante el periodo de crecimiento activo de cada cultivo. Además, establecieron que hay un *lag* entre la humedad del suelo y su respuesta sobre la vegetación. Asimismo, Narasimhan (2004) observó que algunos cultivos y pasturas presentan mejores correlaciones que otros; y lo relacionó principalmente con la profundidad a la cual llega el sistema de raíces de las diferentes especies. Otra observación importante de su estudio fue que durante algunos años obtuvo mejores correlaciones que durante otros. Este resultado lo asoció a que en los años muy húmedos o muy secos el NDVI responde diferente que en los años normales o ligeramente húmedos o secos.

En referencia a lo expuesto anteriormente respecto de la longitud del sistema de raíces de la vegetación, es importante notar que el modelo SWAT estima el contenido de agua del suelo para todo el perfil, incluso más allá de la profundidad a la cual llegan las raíces de los cultivos presentes en el ámbito estudiado. En este sentido, existe una estrecha relación entre la profundidad de las raíces y la respuesta del NDVI. No obstante, este hecho no fue tomado en cuenta en este trabajo y por ello se considera importante su desarrollo a futuro. Wang *et al.* (2007), estudiaron la correlación entre el NDVI y la

## Capítulo 6

humedad del suelo a 5, 10, 20, 50 y 100 centímetros de profundidad en pasturas y especies arbustivas. Estos autores encontraron correlaciones positivas y significativas en toda la profundidad estudiada, sin embargo, a mayor profundidad los valores decrecen y presentan un *lag* estacional cada vez más grande. Asimismo, enfatizaron que estos resultados dependían exclusivamente del tipo de vegetación considerado, es decir, a la longitud de las raíces que alcanza cada especie. Análogamente, Schnur *et al.* (2010) hicieron un estudio similar al anterior, investigando la respuesta del NDVI sobre la humedad del suelo a las mismas profundidades, aunque en este caso el estudio se desarrolló en sitios con suelos de características parecidas. En este trabajo, se encontró que el NDVI correspondiente a vegetación con sistemas de raíces cortos presenta correlaciones positivas y significativas en los primeros centímetros de profundidad del suelo con la humedad del suelo a esas alturas, mientras que los valores disminuyen y presentan un *lag* más amplio a mayor profundidad. Por el contrario, en zonas con especies que tienen sistemas de raíces más profundos observaron que las correlaciones se incrementan con la profundidad.

Por último, al considerar el comportamiento entre grupos, la variabilidad observada mostró que algunas circunstancias locales (tipo y profundidad del suelo, tipo de vegetación presente, homogeneidad de la subcuenca respecto al uso del suelo, etc) contribuyen en los resultados expuestos en el párrafo previo, lo cual afecta la performance de las correlaciones entre la aNDVI y la aHSS. En esta línea, cabe mencionar el estudio realizado por Richards *et al.* (2010), quienes analizaron la correlación entre el NDVI y la humedad de suelo en sitios de características climáticas y edáficas diferentes. Estos autores concluyeron que, tanto la vegetación como el tipo de suelo, juegan un rol sumamente importante en la capacidad del NDVI para representar el contenido de agua del suelo. Además, consideraron que hay principalmente tres factores que influyen sobre los resultados obtenidos en la correlación: tipo de suelo, grado de aridez y tipo de vegetación. Así, suelos con mayor contenido de arcillas pueden retener el agua por periodos más largos, de manera

## Capítulo 6

que los cambios en la precipitación no son reflejados tan fácilmente como en un suelo con mayor contenido de arenas. Por otra parte, encontraron correlaciones más altas en los ambientes más áridos que en los más húmedos. Finalmente, al igual que Wang *et al.* (2007) y Schnur *et al.* (2010), encontraron que las características del sistema de raíces de las especies es determinante a la hora de explicar la correlación existente entre el índice NDVI y el parámetro HSS.

### 6.1.4 Análisis de la performance del modelo SWAT en la detección de sequías.

Para analizar y enriquecer el análisis de la performance del modelo en la detección y caracterización de sequías, se realizó un análisis de la variabilidad temporal de la humedad del suelo junto al índice de sequía e índice verde en forma conjunta. Para ello, se tomó el período completo y un periodo más corto de dos años (tomando como referencia el inicio y fin del ciclo agrícola) para así poder mostrar en mayor detalle el comportamiento de estas variables cuando acontecen episodios de exceso o déficit hídrico.

En las Figuras 6.1 y 6.2 se observa la evolución mensual promediada para toda la cuenca de: la anomalía de la HSS y NDVI, SPI 3 y precipitación, para los periodos (1982-1998) y (1983/84-1984/85), respectivamente. A partir del examen de la serie de tiempo se observa que en general la aHSS sigue el patrón dado por las lluvias y por consiguiente del SPI. La curva de la aHSS mostró un comportamiento relativamente atemperado respecto a los picos del SPI. Así, por ejemplo, si sobrevino un periodo más seco pero previamente ocurrieron situaciones de precipitaciones abundantes, la curva (de aHSS) se mantuvo por encima de la curva del SPI (Figura 6.2). Mientras que si aconteció un episodio seco, pero las condiciones antecedentes fueron situaciones normales o ligeramente más secas, la curva se ajustó a la curva del SPI (Figura 6.2). Lo anterior, ratificó la existencia de un efecto acumulativo de la precipitación (o no precipitación) sobre la humedad del suelo.

La relación entre la aNDVI y aHSS fue más difícil de interpretar, en general, se observó un atraso del índice respecto a la humedad del suelo (de aproximadamente un

## Capítulo 6

mes), pero este comportamiento fue variable entre años y estaciones. Respecto a la variabilidad estacional, es importante notar que la curva de aNDVI entre abril y septiembre no siempre acompañó a la aHSS, e incluso a veces se observó un comportamiento errático, circunstancia que también fue advertida en el análisis de las correlaciones. Estas situaciones podrían darse a causa de que el sistema (en esos meses) se torna más fluctuante. Esto significa que a medida que los cultivos van madurando y se van cosechando, el NDVI ya no refleja únicamente el estado de la vegetación, sino que aparecen mayor cantidad de áreas de suelos desnudos o barbecho (sin vegetación). Otra situación percibida es que ante un contexto duradero de sequía, en el que con todo la vegetación logra crecer, un evento de precipitación reducido (sólo advertido con el SPI 1) tal como el mes de febrero de 1985 (Figura 6.2), impacta en un incremento positivo de la curva de NDVI. Esta particularidad indica que la vigorosidad de los cultivos responde a lluvias menores, aunque el agua no lograra alcanzar la profundidad de todo el perfil del suelo.

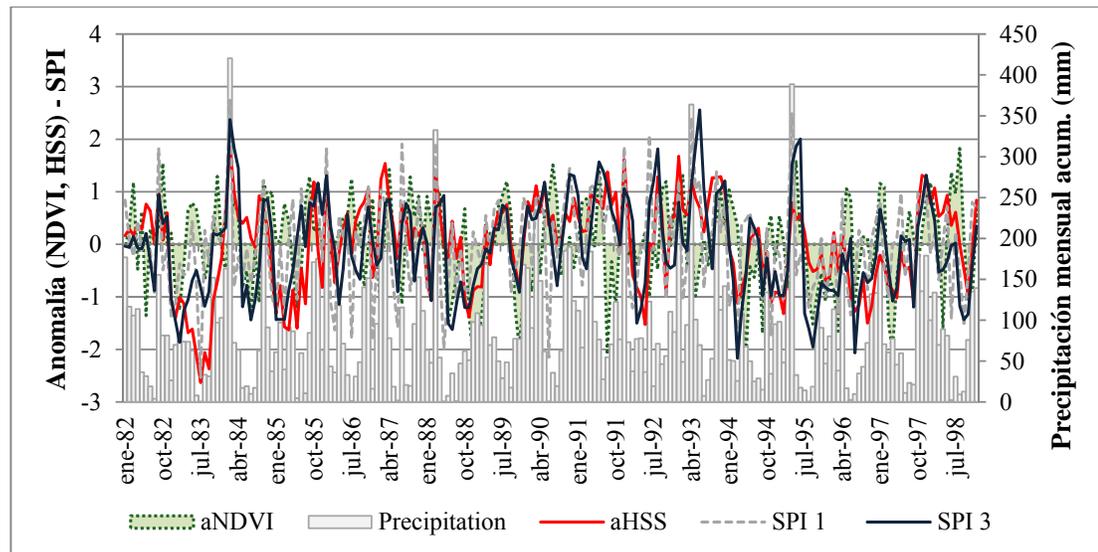


Figura 6. 1. Evolución mensual de la aHSS, la aNDVI, SPI 1, SPI 3 y precipitación para el periodo 1982-1998.

## Capítulo 6

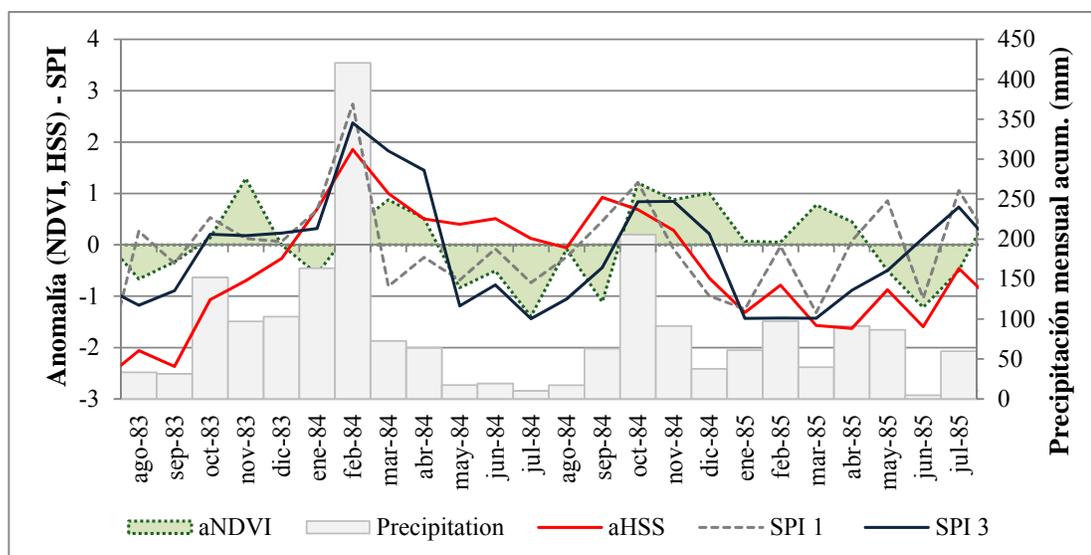


Figura 6. 2. Evolución mensual de la aHSS, la aNDVI, SPI 1, SPI 3 y precipitación para el ciclo agrícola de los años 1983/84 y 1984/85.

## 6.2. Discusión de la metodología y recomendaciones

Entre las conclusiones derivadas de la realización de esta tesis, se puede afirmar que la metodología empleada es replicable a otras cuencas ubicadas en la pampa ondulada. Así, se logró aplicar adecuadamente el modelo hidrológico SWAT en el área de estudio, a pesar de la escasez de información de entrada al modelo. Lo anterior indica que, incluso cuando las cuencas no cuentan con toda la información requerida desde el punto de vista espacial y temporal, el modelo aun así podrá ser utilizado y lograr resultados aceptables más no óptimos. Además, esta tesis corrobora resultados obtenidos por otros investigadores, que indicaron que el modelo SWAT constituye una buena herramienta para reproducir registros históricos de humedad de suelo tal y como concluyen Ming Xing *et al.* (2010), Narasimham (2004), Narasimham *et al.* (2005), entre otros.

El análisis de las correlaciones entre HSS y SPI/NDVI permitió evaluar los eventos de sequías agrícolas parcialmente. Numerosos autores tales como Das *et al.* (2003), Mavi y Tupper (2004) y Sivakumar *et al.* (2005) afirman que la sequía agrícola es un concepto complejo que no puede caracterizarse mediante un único indicador. En este sentido, el uso

## Capítulo 6

del NDVI, no resultó ser el indicador más adecuado para evaluar la performance del modelo SWAT. Así, se observó que en algunas circunstancias como lluvias cortas en una larga situación de sequía, el índice NDVI enmascara los eventos de sequía incrementando su curva, aunque este incremento finalmente no producirá un aumento real en la productividad o el rendimiento de los cultivos.

De los resultados obtenidos en las correlaciones (NDVI vs HSS) a nivel de cuenca, y luego a nivel de grupos, se recomienda continuar con esta evaluación estadística realizando un análisis por tipo de cultivos y por tipos de suelos. Además, habría que incluir la caracterización de la profundidad del sistema radicular de la vegetación, ya que su omisión se considera una limitación de la metodología planteada en esta tesis. Por otro lado, el estudio de las sequías a nivel de subcuenca, por cultivo y suelo, implicaría utilizar la discretización de la cuenca mediante una grilla lo que, por un lado, otorgaría mayor información a nivel espacial pero, por el otro, requeriría de información distribuida espacialmente (particularmente del clima). Asimismo, para futuras investigaciones se recomienda la aplicación de otros índices derivados de imágenes satelitales, que puedan asociarse al rendimiento/productividad de los cultivos más que al estado vegetativo de las plantas. A modo de ejemplo, se puede citar la *f*-apar (radiación fotosintéticamente activa absorbida) o la NPP (productividad primaria neta).

Por otro lado, sería importante analizar las correlaciones de los índices con la humedad de suelo, discriminando los años húmedos, secos y moderados (Narsimhan, 2004). De este modo, se podría descartar o incorporar esta variable como factor incidente en los valores obtenidos en las correlaciones. Por último, también se recomienda continuar investigando en el índice de sequía SPI, ya que este índice da información concreta a los planificadores y gestores de cuencas (particularmente en las grandes cuencas rurales argentinas), sobre las series temporales de precipitación, permitiendo la caracterización de las sequías.

## Capítulo 6

Las limitaciones que tuvo esta investigación están principalmente asociadas la falta de información, tanto a nivel espacial como temporal, para aplicar el modelo hidrológico SWAT con el óptimo de fiabilidad. La carencia de datos distribuidos, principalmente la información referente a las precipitaciones (la más sensible a este respecto), hizo que las dos estaciones meteorológicas utilizadas en la cuenca posiblemente no representen adecuadamente la precipitación media en cada subcuenca. Como resultado, se registraron algunas discrepancias entre las simulaciones y las mediciones observadas. En la medida que hayan más datos e información, de mejor calidad y confiabilidad, así como continuos en el tiempo (sin faltantes), se logrará que la simulación del modelo se ajuste mejor a los datos observados de la cuenca. En consecuencia, el modelo será más confiable a la hora de ser utilizado a estudios como el aquí propuesto.

## Capítulo 7

### **Capítulo 7 : Conclusiones**

El modelo hidrológico SWAT fue usado para desarrollar una serie de datos de humedad de suelo de 20 años (1982-1998) a una resolución temporal mensual. El resultado de la calibración y validación indicó un buen desempeño del modelo. No obstante, éste podría ser más preciso a la hora de simular, en la medida que haya mayor cantidad de datos (en cuanto a uso del suelo, manejo de suelo, información hidrometeorológica, entre otros) y sobre todo en relación a los parámetros de mayor sensibilidad, y que permitan representar mejor al sistema físico real de la cuenca.

Considerando la performance global del modelo, este estudio demostró que SWAT es una herramienta integradora que incluye y tiene en cuenta los diferentes componentes naturales del ciclo hidrológico, el uso y el manejo del suelo, el crecimiento de la cobertura vegetal, etc. Se trata de procesos que se dan especialmente en áreas rurales e intervienen fundamentalmente en las cuencas agrícolas. De este modo, se concluye que con una adecuada parametrización SWAT podría ser aplicado a otras cuencas rurales similares de la región Pampeana.

Una limitante observada al usar el modelo SWAT, es la gran cantidad de parámetros de entrada requeridos, muchos de los cuales están directamente involucrados en los procesos físicos del ciclo hidrológico y de propagación de la escorrentía. Esto trajo aparejado dos inconvenientes: i) la calibración fue compleja; y ii) no se dispuso de toda la información para parametrizar adecuadamente la cuenca.

El estudio del análisis espacio-temporal del SPI y NDVI permitió, por un lado, detectar episodios de sequías dentro del periodo (1982-1998) y, por el otro, agrupar subcuencas a partir de la vegetación para estudiar su comportamiento. A este respecto, la aplicación del SPI fue muy útil en la identificación y clasificación de los eventos de sequías. Por otro lado, la regionalización, en base a los valores de NDVI, permitió agrupar las subcuencas en cuatro *clusters*, revelando que el comportamiento de la vegetación

## Capítulo 7

depende de las circunstancias ambientales locales, especialmente de los tipos de suelos, hecho que posteriormente se volvió a constatar en el análisis de la humedad del suelo.

El análisis de la performance del modelo SWAT, en la detección y caracterización de sequías mediante su asociación y correlación con el índice de sequía (SPI 3) e índice verde (NDVI), mostró por un lado que las correlaciones entre la humedad de suelo simulado y el SPI fueron positivas y significativas (con resultados  $> 0,6$ ). Como consecuencia, se consideró que el SPI es un índice muy útil que brinda información concreta sobre el grado y magnitud de los eventos de sequía. Por otro lado, mostró que las correlaciones con el índice verde (NDVI sin *lag*) fueron positivas y menos significativas que en el caso anterior, alcanzando valores más altos en la etapa de crecimiento de los cultivos. Por tanto, en el análisis no se debe tener en cuenta el fin e inicio del ciclo agrícola.

A pesar de que en esta tesis se han logrado resultados interesantes, a la par que novedosos, cabe reseñar la conveniencia de continuar trabajando en el análisis de la performance del modelo SWAT junto al SPI/NDVI, con el objeto de tratar de explicar aquellos resultados no concluyentes de la investigación, tales como: la existencia de ciclos en las sequías agrícolas extremas; correlación entre la humedad de suelo y NDVI considerando la profundidad de los sistemas de raíces en la vegetación de la cuenca; y correlación entre HSS vs SPI/NDVI discriminando el tipo de año (húmedo, seco, normal).

Al evaluar la variabilidad temporal de los índices y la humedad del suelo simulada, se observó que la curva de HSS sigue el patrón de los índices aunque de modo más suavizado. El ajuste adecuado entre curvas, ratificó que la HSS puede ser usada como un indicador de las sequías agrícolas, permitiendo su monitoreo. Inclusive, se podría utilizar como predictor del comportamiento de las sequías en el corto plazo, si se dispusiera de un pronóstico climático apropiado.

## Capítulo 7

Finalmente, se considera que la tesis al aplicar un modelo hidrológico (modelo SWAT), que puede estimar en forma semidistribuida la humedad del suelo, contribuye al estudio de las sequías de la región pampeana al tiempo que aporta una nueva herramienta para su monitoreo. En este sentido, una vez que el modelo hidrológico ha sido calibrado y validado puede ser utilizado para determinar el estado pasado, actual y futuro del contenido de agua por subcuenca, de manera rápida y económica siempre y cuando el medio ambiente de la cuenca no haya cambiado drásticamente al momento de su calibración/validación. Por otro lado, la asociación de sus resultados (HSS), tanto a índices de sequía como índices verdes para el estudio de las sequías, resultó novedoso para Argentina y abre nuevas líneas de investigación.

## Capítulo 8

**Capítulo 8 : Futuras líneas de investigación**

En este apartado y, a partir del trabajo realizado en esta tesis, se proponen algunas líneas de investigación que pueden ser objeto de interés.

En relación a la modelación de la humedad del suelo aplicando el modelo SWAT: sería interesante estudiar y obtener series de tiempo respecto de los parámetros con mayor grado de sensibilidad. A este respecto, convendría integrar al modelo la información climática e hidrológica incorporada al área de estudio durante los últimos años en la red de observaciones, tanto del INTA como de otras instituciones, para de este modo evaluar el buen funcionamiento del modelo. Asimismo, sería valioso avanzar en la discretización de la cuenca mediante una grilla, utilizando información climática distribuida proveniente de radares meteorológicos, lo que otorgaría mayor información a nivel espacial.

Respecto del índice SPI, sería interesante estudiar la existencia de ciclos en las sequías agrícolas, incorporando otras estaciones meteorológicas de la región y ampliando el periodo de estudio. De este modo, se extendería el estudio de modo espacio-temporal.

Otra línea de trabajo, consistiría en la incorporación de la caracterización de la profundidad alcanzada por los sistemas de raíces de los diferentes tipos de vegetación, para su posterior incorporación a la correlación entre NDVI vs SPI/HSS. Ello permitiría detallar las diferentes respuestas del NDVI ante la cantidad de agua disponible en el suelo.

Al considerar la regionalización realizada en las subcuencas, así como la variabilidad observada entre grupos, sería interesante mejorar y corroborar mediante otras variables (como tipo de suelos, humedad de suelo, etc) y técnicas la regionalización realizada en esta tesis. La metodología en sí resulta de un proceso que a la larga es subjetivo, ya que el número de componentes retenidas y el número óptimo de grupos a ser generados mediante el método k-means fueron definidos por el criterio propuesto en la tesis. Sin embargo, existen otras metodologías alternativas a estas, por ejemplo: respecto al criterio de corte se puede aplicar el *scree test* que toma como criterio el gráfico de la

## Capítulo 8

varianza de cada CP y selecciona las CP anteriores al quiebre o codo del gráfico, otro método es la retención de los autovalores mayores a 1; mientras que en relación a la selección del número óptimo de grupos, existen 30 reglas que fueron evaluadas por Milligan y Cooper (1985). Si optamos por cualquiera de los otros criterios disponibles probablemente el resultado diferiría con el obtenido en la tesis.

Otro aspecto que ha quedado reflejado en la revisión bibliográfica realizada, pero que no fue considerado en la investigación, es el uso de otros índices derivados de imágenes satelitales que puedan asociarse al rendimiento/productividad de los cultivos. Por lo tanto, sería importante incorporar al estudio nuevos índices, como por ejemplo, la  $f$ -apar (radiación fotosintéticamente activa absorbida) o NPP (productividad primaria neta).

Por último, otra línea de trabajo planteada es el análisis de las correlaciones de la HSS vs SPI/NDVI, clasificando y discriminando los años húmedos, secos y moderados, para de este modo descartar o incorporar esta variable como otro factor causal explicativo de los valores bajos en las correlaciones.

Anexos

## Anexo 1: Datos de entrada para generar el modelo de cuenca

### Formatos requeridos por SWAT para cada variable climática.

SWAT requiere de información climática diaria de precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Cada una de estas variables, son leídas por SWAT en un formato establecido. Si bien en esta tesis se ha mostrado como separador de decimales la coma, en los Anexos, a partir de aquí se utilizará el punto debido a que los programas utilizados requieren la configuración regional de Estados Unidos.

En líneas generales, los archivos no deben tener espacios/filas en blanco. Cuando se considera un periodo particular de tiempo, p.e. 1/1/1967 a 31/12/2001, no pueden faltar fechas; es decir, el número de filas del archivo debe coincidir con el número de días del periodo. En caso de que el dato esté ausente o se considere erróneo debe ser reemplazado por -99.0.

**Precipitación:** precipitación caída durante el día en unidades de “mm”.

Los archivos que identifican las estaciones, deberán tener el formato dado en la Tabla A1.1.

Tabla A1. 1. Descripción del archivo de entrada de precipitación (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>
<i>ID</i>	Numero identificador de la estación meteorológica en el SIG
<i>Name</i>	Nombre dado al archivo correspondiente a cada estación para la variable precipitación.
<i>Lat.</i>	Latitud
<i>Long.</i>	Longitud
<i>Elevation</i>	Elevación (m)

El archivo para cada estación meteorológica (\*.pcp) de precipitación diaria, puede ser armado en un archivo tipo “txt”. Este archivo deberá ser nombrado con el mismo

## Anexos

nombre dado al archivo de entrada que identifica las estaciones. El archivo deberá poseer 8 dígitos p.e. “nh0145pp”. El encabezado del archivo corresponderá a la fecha de inicio de los datos año-mes-día y tendrá el formato: *yyyymmdd*, p.e. 19670101. Abajo, continuaran los datos correspondientes a la precipitación, en la que cada fila corresponderá al registro de cada día. Los datos tendrán el siguiente formato de número: *xxx.x*, p.e. 001.2.

**Temperatura:** máxima y mínima temperatura registrada en el día en unidades de “°C”.

Los archivos que identifican las estaciones, deberán tener el formato dado en la Tabla A1.2.

Tabla A1. 2. Descripción del archivo de entrada de temperatura (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>
<i>ID</i>	Numero identificador de la estación meteorológica en el SIG
<i>Name</i>	Nombre dado al archivo correspondiente a cada estación para la variable temperatura.
<i>Lat.</i>	Latitud
<i>Long.</i>	Longitud
<i>Elevation</i>	Elevación (m)

El archivo para cada estación meteorológica (\*.tmp) de temperatura diaria, puede ser armado en un archivo tipo “txt”. Este archivo deberá ser nombrado con el mismo nombre dado al archivo de entrada que identifica las estaciones, y que deberá poseer 8 dígitos p.e. “nh0145tm”. El encabezado del archivo corresponderá a la fecha de inicio de los datos año-mes-día y tendrá el siguiente formato: *yyyymmdd*, p.e. 19670101. Seguidamente, se listarán los datos correspondientes a temperatura, en la que cada fila corresponderá al registro de cada día. La primera posición corresponderá a la temperatura máxima y la segunda, separada mediante una coma, a la temperatura mínima, resultando el siguiente formato de número: *xxx.x,xxx.x*, p.e. 021.2,012.8.

**Velocidad del viento:** velocidad del viento promedio a 2 metros de altura registrada en el día en unidades de “m/s”.

## Anexos

Los archivos que identifican las estaciones, deberán tener el formato dado en la Tabla A1.3.

Tabla A1. 3. Descripción del archivo de entrada de velocidad de viento (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>
<i>ID</i>	Numero identificador de la estación meteorológica en el SIG
<i>Name</i>	Nombre dado al archivo correspondiente a cada estación para la variable velocidad de viento.
<i>Lat.</i>	Latitud
<i>Long.</i>	Longitud

El archivo para cada estación meteorológica (\*.wnd) de velocidad de viento, puede ser armado en un archivo tipo “txt”. Este archivo deberá ser nombrado con el mismo nombre dado al archivo de entrada que identifica las estaciones, y que deberá poseer 8 dígitos p.e. “nh0145wn”. El encabezado del archivo corresponderá a la fecha de inicio de los datos año-mes-día y tendrá el siguiente formato: *yyyymmdd*, p.e. 19670101. Seguidamente, se listarán los datos correspondientes a velocidad de viento, en la que cada fila corresponderá al registro de cada día. Los datos de tendrán el siguiente formato de número: *xxxx.xxx*, p.e. 0002.220.

**Humedad relativa:** la humedad relativa media registrada en el día se expresa en términos de fracción.

Los archivos que identifican las estaciones, deberán tener el formato dado en la Tabla A1.4.

Tabla A1. 4. Descripción del archivo de entrada de humedad relativa (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>
<i>ID</i>	Numero identificador de la estación meteorológica en el SIG
<i>Name</i>	Nombre dado al archivo correspondiente a cada estación para la variable humedad relativa.
<i>Lat.</i>	Latitud
<i>Long.</i>	Longitud

## Anexos

El archivo para cada estación meteorológica (\*.hmd) de humedad relativa, puede ser armado en un archivo tipo “txt”. Este archivo deberá ser nombrado con el mismo nombre dado al archivo de entrada que identifica las estaciones, y que deberá poseer 8 dígitos p.e. “nh0145hm”. El encabezado del archivo corresponderá a la fecha de inicio de los datos año-mes-día y tendrá el siguiente formato: *yyyymmdd*, p.e. 19670101. A continuación se listarán los datos correspondientes a la humedad relativa, en la que cada fila corresponderá al registro de cada día. Los datos tendrán el siguiente formato de número: *xxxx.xxx*, p.e. 000.870.

**Radiación solar:** radiación solar global media registrada en el día en unidades de “MJ/m<sup>2</sup>”.

Los archivos que identifican las estaciones deberán tener el formato dado en la Tabla A1.5.

Tabla A1. 5. Descripción del archivo de entrada de radiación solar (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Variables</b>	<b>Definición</b>
<i>ID</i>	Numero identificador de la estación meteorológica en el SIG
<i>Name</i>	Nombre dado al archivo correspondiente a cada estación para la variable radiación solar.
<i>Lat.</i>	Latitud
<i>Long.</i>	Longitud

El archivo para cada estación meteorológica (\*.srl) de radiación solar, puede ser armado en un archivo tipo “txt”. Este archivo deberá ser nombrado con el mismo nombre dado al archivo de entrada que identifica las estaciones, y que deberá poseer 8 dígitos p.e. “nh0145sr”. El encabezado del archivo corresponderá a la fecha de inicio de los datos año-mes-día y tendrá el siguiente formato: *yyyymmdd*, p.e. 19670101. Seguidamente, se listarán los datos correspondientes a la radiación solar, en la que cada fila corresponderá al registro de cada día. Los datos tendrán el siguiente formato de número: *xxxx.xxx*, p.e. 0022.600.

## Anexos

**Formatos requeridos para cada variable climática por “WGNmaker4.xlsm”, para generar el simulador climático de SWAT.**

WGNmaker4 requiere de información climática diaria de precipitación, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, punto de rocío y máxima precipitación caída en ½ hora. Cada una de estas variables, son leídas por el programa en un formato establecido. Los archivos no deben tener espacios/filas en blanco, no pueden faltar fechas y en caso de que el dato esté ausente o se considere erróneo debe ser reemplazado por -99.

En primer lugar, se debe armar el archivo madre que identificará el resto de los archivos de cada variable y estación, según el orden establecido en la Tabla A1.6.

Tabla A1. 6. Archivo madre para vincular variables, estaciones meteorológicas y WGNmaker4 (Fuente: Manual WGNmaker4).

<b>Columna</b>	<b>Definición</b>	<b>Especificaciones</b>
A	Nombre identificador de la estación meteorológica, con la terminación “wgn” (p.e. NH0145wgn).	requerido
B	Nombre que será dado al archivo de salida a cada estación meteorológica (p.e. NH0145salida).	Opcional, hasta con 80 caracteres.
C	Latitud	Opcional (-90 a 90)
D	Longitud	Opcional (-180 a 180)
E	Elevación (m)	Opcional (0 a 5000)
F	Nombre del archivo de precipitación, con la terminación “_pcp” (p.e. NH0145_pcp).	Opcional
G	Nombre del archivo de temperatura, con la terminación “_tmp” (p.e. NH0145_tmp).	Opcional
H	Nombre del archivo de radiación solar, con la terminación “_srl” (p.e. NH0145_srl).	Opcional
I	Nombre del archivo de velocidad de viento, con la terminación “_wnd” (p.e. NH0145_wnd).	Opcional
J	Nombre del archivo de punto de rocío, con la terminación “_dwp” (p.e. NH0145_dwp).	Opcional
K	Nombre del archivo de máxima precipitación caída en ½ hora, con la terminación “_hrh” (p.e. NH0145_hrh).	Opcional

Posteriormente, para armar cada archivo de entrada se siguió el formato que se muestra en la Tabla A1.7.

## Anexos

Tabla A1. 7. Formato de datos de entrada al WGNmaker4 (Fuente: Manual WGNmaker4).

Variables	Unidades	Formato de las columnas de cada variable (x.xx)		
Precipitacion	mm	Mm/dd/yyyy	Precip.	
Temperatura	°C	Mm/dd/yyyy	Temp. Max.	Temp. Min.
Radiación Solar	MJ/m <sup>2</sup> /día	Mm/dd/yyyy	Rad. Sol	
Velocidad de viento	m/s	Mm/dd/yyyy	Veloc. Prom.	
Punto de rocío	°C	Mm/dd/yyyy	Punto de Rocío	
Máxima precipitación en ½ hora	mm	Mm/dd/yyyy	Lluvia max.	

Así, por ejemplo, para la precipitación se debería armar el siguiente archivo:

```

date      PRECIP
1/1/1971  0.00
1/2/1971  0.00
1/3/1971  0.50
1/4/1971  0.00
1/5/1971  0.00

```

#### Formatos requeridos por SWAT para la cobertura de uso de suelo.

La cobertura digital de uso de suelo ingresada al modelo, se asoció a un archivo denominado LUC. En esta tesis, este archivo, fue creado por *ad hoc*; es decir, no se usaron los archivos dados por el programa ya que los usos del suelo pueden llegar a tener diferencias respecto a los de Estados Unidos. Este archivo permitió vincular el uso de suelo de la cobertura digital a diferentes tablas (p.e. *crop, urban, HRU, mgt*, etc.), y cada uso se asoció mediante un identificador. De este modo, cada una de estas tablas asignó diferentes parámetros que, a su vez, en parte están asociados al uso de suelo. Debajo, se muestra, a modo de ejemplo, algunos de los usos del suelo en el formato seleccionado.

```

0, MONT
1, AGUA
2, BASD
3, GIRA
4, MAIZ

```

Donde: MONT (montes), AGUA (agua), BASD (barbecho y suelo desnudo), GIRA (girasol), MAIZ (maíz).

## Anexos

Las otras tablas modificadas de la base de datos original de SWAT, fueron: \*.urban y \*.crop. En estas tablas, se dejaron los tipos usos de suelos identificados mediante clasificación y se asoció su nombre al cultivo o uso de suelo más parecido encontrado en la base de datos original. Si bien, finalmente se utilizaron los valores originales, el objetivo fue dejar armada una nueva tabla vinculada a la base de datos, de manera que en el futuro se puedan reemplazar fácilmente estos datos por información local. En las Tablas A1.8 y A1.9, se muestran los diferentes parámetros de las tablas *urban* y *crop*, respectivamente.

Tabla A1. 8. Parámetros incluidos dentro de la tabla *urban* (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Columna</b>	<b>Descripción y formato</b>
OBJECTID	Identificador del objeto dentro de la tabla.
IUNUM	Numero identificador de un uso del suelo particular dado por LUC. (i3).
URBNAME	Identificador del tipo de suelo urbano, código de 4 caracteres. (a4).
URBFLNM	Descripción del tipo de uso de suelo urbano, de hasta 55 caracteres. (a55).
FIMP	Fracción total del área impermeable para el tipo de uso de suelo urbano considerado. (xxxx.xxx).
FCIMP	Fracción del área impermeable, para el uso de suelo urbano considerado, directamente conectado al sistema de drenaje urbano. (xxxx.xxx).
CURBDEN	Densidad de cunetas en los tipos de usos de suelo urbano (km/ha). (xxxx.xxx).
URBCOEF	Coefficiente para remover los diferentes constituyentes (de la erosión) provenientes del área impermeable ( $\text{mm}^{-1}$ ). (xxxx.xxx).
DIRTMX	Cantidad máxima de sólidos permitidos acumular sobre un área impermeable (kg/curb km). (xxxx.xxx).
THALF	Número de días en la que se acumulan las cantidades de sólidos permitidos, sobre las áreas impermeables, kg/curb km a la $\frac{1}{2}$ del máximo permitido. (xxxx.xxx).
TNCONC	Concentración total de nitrógeno en suspensión sólida proveniente de área impermeables (mg N/kg sed). (xxxx.xxx).
TPCONC	Concentración total de fósforo en suspensión sólida provenientes de áreas impermeables (mg P/kg sed). (xxxx.xxx).
TNO3CONC	Concentración de nitrato en suspensión sólida proveniente de áreas impermeables (mg $\text{NO}_3\text{-N}$ /kg sed). (xxxx.xxx).
URBCN2	Número de curva para la condición de humedad tipo II en áreas impermeables de tipos de suelo urbano. (xxxx.x).

## Anexos

Tabla A1. 9. Parámetros incluidos dentro de la tabla *crop* (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Columna</b>	<b>Descripción y formato</b>
OBJECTID	Identificador del objeto dentro de la tabla.
ICNUM	Numero identificador de un uso del suelo particular dado por LUC (f. libre).
CPNM	Identificador del tipo de uso de suelo, código de 4 caracteres (a4)
IDC	Tipo de cobertura/vegetación presente: 1. Legumbres anuales de estación cálida, 2. Legumbres anuales de estación fría, 3. Legumbre perennes, 4. Anuales de estación cálida, 5. Anuales de estación fría, 6. Perennes, 7. Árboles. (f. libre).
CROPNAME	Nombre completo del tipo de especie o cobertura vegetal. (formato libre).
BIO_E	Eficiencia del uso de radiación o razón entre la biomasa y energía ((kg/ha)/(MJ/m <sup>2</sup> )). (f. libre).
HVSTI	Índice de cosecha para óptimas condiciones de crecimiento. (f. libre).
BLAI	Índice del área foliar máxima potencial. (f. libre).
FRGRW1	Fracción del crecimiento estacional de la planta o fracción de unidades de calor del total potencial correspondiente al primer punto óptimo de la curva desarrollo de área foliar. (f. libre).
LAIMX1	Fracción del máximo índice de área foliar correspondiente al primer punto óptimo de la curva desarrollo de área foliar. (f. libre).
FRGRW2	Fracción del crecimiento estacional de la planta correspondiente al segundo punto óptimo de la curva desarrollo de área foliar. (f. libre).
LAIMX2	Fracción del máximo índice de área foliar correspondiente al segundo punto óptimo de la curva desarrollo de área foliar. (f. libre).
DLAI	Fracción del crecimiento estacional cuando el área foliar comienza a declinar. (f. libre).
CHTMX	Altura máxima de canopeo (m). (f. libre).
RDMX	Máxima profundidad de raíces (m). (f. libre).
T_OPT	Temperatura de crecimiento óptima para la planta (°C). (f. libre).
T_BASE	Temperatura mínima base de crecimiento para la planta (°C). (f. libre).
CNYLD	Fracción normal de nitrógeno en el rendimiento (kg N/kg yield). (f. libre).
CPYLD	Fracción normal de fósforo en el rendimiento (kg P/kg yield). (f. libre).
BN1	Parámetro de consumo de nitrógeno 1: emergencia (kg N/kg biomass). (f. libre).
BN2	Parámetro de consumo de nitrógeno 2: 50% de madurez (kg N/kg biomass). (f. libre).
BN3	Parámetro de consumo de nitrógeno 3: a la madurez (kg N/kg biomass). (f. libre).
BP1	Parámetro de consumo de fósforo 1: emergencia (kg P/kg biomass). (f. libre).

## Anexos

(continuación Tabla A1.9)

BP2	Parámetro de consumo de fósforo 2: 50% de madurez (kg P/kg biomass). (f. libre).
BP3	Parámetro de consumo de fósforo 3: a la madurez (kg P/kg biomass). (f. libre).
WSYF	Límite menor del índice de cosecha ((kg/ha)/(kg/ha)) (f. libre).
USLE_C	Valor mínimo del factor de USLE C. (f. libre).
GSI	Máxima conductancia de las estomas a alta radiación solar y baja presión de vapor ( $\text{m s}^{-1}$ ). (f. libre).
VPDFR	Déficit de presión de vapor (kPa) correspondiente al segundo punto sobre la curva de conductancia de los estomas. (f. libre).
FRGMAX	Fracción de la máxima conductancia de los estomas, correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia de los estomas. (f. libre).
WAVP	Tasa de declinación en el uso eficiente de la radiación por unidad incremental en el déficit de vapor de presión. (f. libre).
CO2HI	Concentración de CO <sub>2</sub> atmosférico ( $\mu\text{L CO}_2/\text{L air}$ ) correspondiente al segundo punto sobre la curva de eficiencia del uso de la radiación. (f. libre).
BIOEHI	Tasa de biomasa-energía correspondiente al segundo punto sobre la curva de eficiencia del uso de la radiación. (f. libre).
RSDCO_PL	Coefficiente de la descomposición de los residuos vegetales. (f. libre).
ALAI_MIN	Índice mínimo de área foliar para la planta durante el periodo de inactivo ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ). (f. libre).
BIO_LEAF	Fracción de biomasa arbórea acumulada cada año que posteriormente es convertida en residuos durante el periodo de latencia o inactivo. (f. libre).
MAT_YRS	Número de años requerido para las especies arbóreas para llegar al desarrollo completo (años). (f. libre).
BMX_TREES	Máxima biomasa para un bosque (ton/ha). (f. libre).
EXT_COEF	Coefficiente de extinción de luz. (f. libre).
BM_DIEOFF	Fracción de biomasa muerta. (f. libre).

**Formatos requeridos por SWAT para el tipo de suelo.**

La cobertura digital de suelos ingresada al modelo, se asoció a un archivo denominado SoilC. En esta tesis, este archivo, fue creado por *ad hoc*; es decir, no se usaron los archivos dados por el programa ya que los tipos de suelos y el sistema de clasificación son diferentes a los de la base de datos original. Este archivo permitió vincular el suelo de la cobertura digital a diferentes tablas (p.e. *crop*, *urban*, *HRU*, *mgt*, etc.), y cada suelo se asoció mediante un identificador. De este modo, cada una de estas tablas asignó diferentes

## Anexos

parámetros, que su vez, en parte están asociados al tipo de suelo. Debajo, se muestra, a modo de ejemplo, algunos de los tipos de suelo ingresados en el formato seleccionado.

Cada uno de los nombres identifica al suelo a nivel de serie.

- 0, AGUSTIN ROCA
- 1, CHACABUCO
- 2, COMPLEJO
- 3, JUNIN
- 4, MEMBRILLAR

La otra tabla modificada, de la base de datos original de SWAT, fue: \*.sol. En cada tipo de suelo identificado en el área de estudio, se ingresó cada uno de los parámetros requeridos. En las Tablas A1.10, se muestran los diferentes parámetros de la tabla *sol*.

Tabla A1. 10. Parámetros incluidos dentro de la tabla *sol* (Arnold *et al.*, 2011).

Columna	Descripción y formato
OID	Identificador del objeto dentro de la tabla
TTITLE/TEXT	Título. (a80).
SNAM	Nombre del suelo. (a16).
NLAYERS	Número de horizontes presente en la unidad.
HYDGRP	Grupo hidrológico del suelo (A, B, C, D). (a1).
SOL_ZMX	Máxima profundidad de las raíces (mm). (xxxxxxxxxx.xx).
ANION_EXCL	Fracción de porosidad del cual los aniones son excluidos. (x.xxx).
SOL_CRK	Potencial o máximo volumen de agrietamiento del suelo expresado como fracción total del volumen de suelo total. (x.xxx).
TEXTURE	Textura del suelo. (a80).
SOL_Z(#)	Máxima profundidad de las raíces (mm). (xxxxxxxxxx.xx).
SOL_BD(#)	Densidad de humedad aparente (Mg/m <sup>3</sup> ). (xxxxxxxxxx.xx).
Información requerida por horizonte para cada tipo de suelo	
SOL_AWC(#)	Capacidad de agua disponible en el suelo (mm H <sub>2</sub> O/mm suelo). (xxxxxxxxxx.xx).
SOL_K(#)	Conductividad hidráulica saturada (m/h). (xxxxxxxxxx.xx).
SOL_CBN(#)	Contenido de Carbono Orgánico (% Peso del suelo). (xxxxxxxxxx.xx).
CLAY(#)	Contenido de arcilla (% Peso del suelo). (xxxxxxxxxx.xx).
SILT(#)	Contenido de limo (% Peso del suelo). (xxxxxxxxxx.xx).
SAND(#)	Contenido de arena (% Peso del suelo). (xxxxxxxxxx.xx).
ROCK(#)	Contenido de fragmentos de roca (% Peso del suelo). (xxxxxxxxxx.xx).

## Anexos

(continuación Tabla A1.10)

SOL_ALB(#)*	Albedo suelo húmedo. (xxxxxxxxxx.xx).
USLE_K(#)*	Ecuación Universal de Perdida del Suelo ((ton m <sup>2</sup> h)/(m <sup>3</sup> - ton cm)). (xxxxxxxxxx.xx).
SOL_EC(#)	Conductividad eléctrica (dS/m). (xxxxxxxxxx.xx).

\*Únicamente para horizontes superficiales

**Anexo 2: Resto de datos de entrada****Formato requerido por SWAT para las tablas de manejo.**

De la base de datos original de SWAT, se modificaron las tablas \*.mgt1 y \*.mgt2. Estos archivos incluyen las prácticas de manejo sobre cultivos y vegetación en general. A modo de ejemplo se pueden citar: siembra, cosecha, riego, fertilización, aplicación de pesticidas y labranza; y son divididos en dos secciones. En la primer sección, tabla \*.mgt1, se incluyen las condiciones iniciales y aquellas prácticas que nunca cambian durante la simulación. En la segunda sección, tabla \*.mgt2 se listan el esquema de manejos de las operaciones que ocurren en fechas o tiempos específicos (Arnold *et al.*, 2011) tales como (1 siembra y comienzo de crecimiento estacional, 2 riego, 3 aplicación de fertilizantes, 4 aplicación de pesticidas, 5 cosecha y remoción de residuos secos, 6 labranza, 7 cosecha, 8 remoción de residuos y fin de estación de crecimiento, 9 pastoreo, 10 auto-riego, 11 auto-fertilización, 12 remoción de sedimentos y nutrientes, 13 liberación de agua almacenada en HRUs con arroz u otros cultivos, 14 fertilización continua, 15 aplicación continua de pesticidas, 0 culminación del año de rotación). Las prácticas de manejo fueron elaboradas a partir de los manuales de prácticas de manejo de cultivos del INTA de la zona norte de Buenos Aires. Asimismo, se consideraron rotaciones de cultivos de tres años (ver Capítulo 4). En las Tablas A2.1 y A2.2, se muestran los diferentes parámetros de las tablas *mgt1* y *mgt2*, respectivamente.

## Anexos

Tabla A2. 1. Parámetros iniciales y generales incluidos dentro de la tabla mgt1 (Arnold et al., 2011).

Columna	Descripción y formato
OID	Identificador del objeto dentro de la tabla
TITLE	Título (a80)
NMGT	Código de manejo. (f. libre).
IGRO	Estado de la cobertura (0 sin crecimiento, 1 en crecimiento). (f. libre).
PLANT_ID	Número identificador de la cobertura dado por LUC. (f. libre).
LAI_INIT	Índice de área foliar inicial. (f. libre).
BIO_INIT	Peso seco de la biomasa inicial (kg/ha). (f. libre).
PHU_PLT	Número de horas de calor o días necesarios para que la planta llegue a la madurez. (f. libre).
BIOMIX	Eficiencia de la mezcla biológica. (f. libre).
CN2	Curva número inicial para la condición de humedad II. (f. libre).
USLE_P	Ecuación USLE. (f. libre).
BIO_MIN	Mínima biomasa vegetal para el pastoreo (kg/ha). (f. libre).
FILTERW	Anchura de las franjas de filtración (m). (f. libre).
IURBAN	Código de simulación para el uso de suelo urbano (0 no hay secciones urbanas en la HRU, 1 hay secciones urbanas en la HRU que son simuladas con las ecuaciones de regresión de USGS, 2 hay secciones urbanas en la HRU que son simuladas utilizando el algoritmo <i>build up/wash off</i> ). (f. libre).
URBLU	Número de identificación del tipo de uso de suelo de la base de datos <i>Urban</i> . (f. libre).
IRRSC	Código de riego (0 sin riego, 1 extracción del río, 2 extracción desde un reservorio, 4 extracción desde el acuífero superficial, 5 extracción desde el acuífero profundo). (f. libre).
IRRNO	Origen de la fuente de riego (1: número del curso de agua donde es extraída el agua, 2: número de reservorio desde donde se extrae el agua, 3 o 4: número de subcuenca desde donde es extraída el agua) Requerido sólo si hay riego. (f. libre).
FLOWMIN	Flujo de agua mínimo requerido para extraer agua desde un curso de agua ( $m^3/s$ ). (f. libre).
DIVMAX	Extracción máxima de agua diaria desde un curso de agua. (f. libre).
FLOWFR	Fración disponible de flujo que es permitida en el riego para cada HRU. (f. libre).
DDRAIN	Profundidad del drenaje subsuperficial (mm). (f. libre).
TDRAIN	Tiempo de drenaje de suelo a capacidad de campo (hs.). (f. libre).
GDRAIN	Tiempo de retardo de drenaje (hs.). (f. libre).
NROT	Número de años de rotación. (f. libre).

## Anexos

Tabla A2. 2. Parámetros de los esquemas de manejo de las operaciones incluidos dentro de la tabla *mgf2* (Arnold *et al.*, 2011).

<b>Columna</b>	<b>Descripción y formato</b>
MONTH	Mes en que toma lugar la operación. (i2).
DAY	Día en que se realiza la operación. (i2).
HUSC	Fracción del total base 0 de unidades de calor en el cual se realiza la operación. (xxxx.xxx)
MGT_OP	Tipos de operaciones de manejo (1 siembra y comienzo de crecimiento estacional). (i2)
HEATUNITS	Total de unidades de calor requeridas por la planta para llegar a la madurez. (xxxx.xxxxx)
PLANT_ID	Número de identificación del tipo de uso de suelo. (i4).
CURYR_MAT	Edad actual de los arboles (años). (i2).
LAI_INIT	Índice inicial de área foliar. (xxx.xx).
BIO_INIT	Peso seco inicial de la biomasa (kg/ha). (xxxxx.xxxxx)
HI_TARG	Índice de cosecha propuesto (objetivo) ((kg/ha)/(kg/ha)). (x.xx).
BIO_TARG	Biomasa objetivo (peso seco) (ton/ha). (xxxxx.xx).
CNOP	Numero de curva número para la condición de humedad II, para la operación específica. (xx.xx).
IRR_AMT	Profundidad de la capa de agua de riego aplicada en la HRU (mm). (xxxxxx.xxxxx).
FERT_ID	Número de identificación del tipo de fertilizante utilizado de la base de datos. (i4).
FRT_KG	Cantidad de fertilizante aplicado a la HRU (kg/ha). (xxxxxx.xxxxx)
FRT_SURFACE	Fracción de fertilizante aplicado en los 10 mm superficiales de suelo. (xxx.xx).
PEST_ID	Código de identificación de pesticida de la base de datos. (i2).
PST_KG	Cantidad de pesticida aplicado a la HRU (kg/ha). (i4).
TILLAGE_ID	Código de labranza implementado (ver base de datos). (i4).
HARVEFF	Eficiencia de cosecha. (xxxxxx.xxxxx)
HI_OVR	Índice de cosecha en destino ((kg/ha)/(kg/ha)). (xxx.xx)
FRAC_HARVK	Fracción de remoción de rastrojo. (xxxxx.xxxxx)
GRZ_DAYS	Número de días consecutivos de pastoreo en la HRU. (i4)
MANURE_ID	Código de identificación del tipo de abono de la base de datos de fertilizantes. (i3)
BIO_EAT	Peso seco de biomasa consumido diariamente ((kg/ha)/día). (xxxxxx.xxxxx).
BIO_TRMP	Peso seco de la biomasa pisoteada diariamente ((kg/ha)/día). (xxx.xx)

## Anexos

(continuación Tabla A2.2.)

MANURE_KG	Peso seco de abono depositado diariamente ((kg/ha)/día). (xxxxx.xxxxx).
WSTRS_ID	Identificador de estrés ( 1 según la demanda de la planta, 2 según el contenido de agua en el suelo).
AUTO_WSTRS	Código del origen de la agua del auto-riego (0 sin riego, 1 extracción del río, 2 extracción desde un reservorio, 4 extracción desde el acuífero superficial, 5 extracción desde el acuífero profundo). (xxxxxx.xxxxx).
AFERT_ID	Número de identificación del fertilizante aplicado de la base de datos. (i4).
NSTRESS	Código del método utilizado para determinar la cantidad de nitrógeno en la HRU (0 nitrógeno planificado, 1 aproximación anual).
AUTO_NSTRS	Factor de estrés de nitrógeno en la vegetación que activa la fertilización. (xxxxxx.xxxxx).
AUTO_NAPP	Cantidad máxima de nitrógeno mineralizado permitido en una aplicación (kg N/ha). (xxx.xx).
AUTO_NYR	Cantidad máxima de nitrógeno mineralizado permitido en un año cualquiera (kg N/ha). (xxxxx.xxxxx).
AUTO_EFF	Eficiencia en la aplicación (<1, =1, >1). (x.xx)
AFRT_SURFACE	Fracción de fertilizante aplicado en los 10 mm superficiales del suelo. (xxxxx.xx)
SWEEPEFF	Eficiencia de remoción de la operación de barrido, en fracción entre 0.0 y 1.0. (xxxxxx.xxxxx).
FR_CURB	Fracción de la longitud de curva disponible para el barrido (0.001 a 1.00). (xxx.xx).
IMP_TRIG	Código de liberación/embalse (0 agua inicial embalsada, 1 agua inicial liberada). (i4)
FERT_DAYS	Duración del periodo de fertilización continua (días) en la HRU. (i4).
CFRT_ID	Número de identificación del fertilizante/abono de la base de datos. (i3).
IFRT_FREQ	Frecuencia de aplicación (días). (i2)
CFRT_KG	Cantidad de fertilizante/abono aplicado al suelo en cada aplicación (kg/ha). (xxxxxx.xxxxx).
PST_DEP	Profundidad de pesticida incorporado en el suelo (mm). (xxx.xx).
IHV_GBM	Código de biomasa o pasto a cosechar (0 biomasa, 1 pasto). (i3).
IRR_SALT	Concentración de sales en el riego (mg/kg). (xxx.xx).
IRR_EFM	Eficiencia del riego (0-1). (xxxxxx.xxxxx).
IRR_SQ	Tasa de escurrimiento superficial (0-1) en fracción. (x.xx)
IRR_EFF	Eficiencia del riego (0.0-100.0). (xxx.xx).

## Anexos

(continuación Tabla A2.2.)

IRR_MX	Cantidad de agua de riego aplicada cada vez que el sistema de auto-riego es activado (mm) (0.0-100.0). (xxxxx.xxxxx).
IRR_ASQ	Tasa de escorrentía superficial (0-1) en fracción. (x.xx).
CPST_ID	Número de identificación de pesticida de la base de datos de pesticidas. (i4)
PEST_DAYS	Número de días continuos de aplicación de pesticidas. (i3)
IPEST_FREQ	Número de días entre aplicaciones. (i2)
CPST_KG	Cantidad de pesticidas aplicado a la HRU en un día dado (kg/ha). (xxxxxx.xxxxx).
BURN_FRLB	Fracción de biomasa, nitrógeno y fósforo en la planta, nitrógeno y fosforo orgánico en la superficie del suelo remanente luego de la quema (en fracción). (xxxxxx.xxxxx).
IRR_SC	Código de la procedencia del riego (0 sin riego, 1 extracción del río, 2 extracción desde un reservorio, 4 extracción desde el acuífero superficial, 5 extracción desde el acuífero profundo).
IRR_NO	Localización de la fuente de agua para riego (1: número del curso de agua donde es extraída el agua, 2: número de reservorio desde donde se extrae el agua, 3 o 4: número de subcuena desde donde es extraída el agua) Requerido sólo si hay riego. (f. libre).
IRR_SCA	Código de la procedencia del auto-riego (0 sin riego, 1 extracción del río, 2 extracción desde un reservorio, 4 extracción desde el acuífero superficial, 5 extracción desde el acuífero profundo). (i3).
IRR_NOA	Localización de la fuente del agua para el auto-riego (1: número del curso de agua donde es extraída el agua, 2: número de reservorio desde donde se extrae el agua, 3 o 4: número de subcuena desde donde es extraída el agua) Requerido sólo si hay riego. (i2).

**Formato y variables requeridas por SWAT para las tablas de agua subterránea.**

De la base de datos original de SWAT se modificó la tabla \*.gw. Este archivo incluye los parámetros de los acuíferos superficial y profundo y propiedades que permiten el movimiento de agua en los acuíferos. En la Tablas A2.3, se muestran los diferentes parámetros de la tabla gw.

## Anexos

Tabla A2. 3. Parámetros de los acuíferos superficial y profundo incluido dentro de la tabla *gw* (Arnold *et al.*, 2011).

Columna	Descripción y formato
TITLE	Título. (a80)
SHALLST	Profundidad de agua inicial en el acuífero superficial (mm H <sub>2</sub> O). (f. libre).
DEEPST	Profundidad de agua inicial en el acuífero profundo (mm H <sub>2</sub> O). (f. libre).
GW_DELAY	Tiempo de retardo del agua subterránea (días). (f. libre).
ALPHA_BF	Factor alfa del flujo de base (1/días). (f. libre).
GWQMN	Límite de profundidad de agua el acuífero superficial para que ocurra el retorno de flujo (mm H <sub>2</sub> O). (f. libre).
GW_REVAP	Coefficiente de evaporización del agua subterránea hacia la zona no saturada del suelo. (f. libre).
REVAPMN	Límite de profundidad de agua en el acuífero superficial para evaporizar hacia la zona no saturada del suelo o percolación hacia el acuífero profundo (mm H <sub>2</sub> O). (f. libre).
RCHRG_DP	Fracción de percolación al acuífero profundo. (f. libre).
GWHT	Altura inicial del agua subterránea (m). (f. libre).
GW_SPYLD	Rendimiento específico del acuífero superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ). (f. libre).
SHALLST_N	Concentración inicial de nitratos en el acuífero superficial (mg N/L o ppm). (f. libre).
GWSOLP	Concentración inicial de fósforo soluble del agua subterránea que contribuye al curso de agua principal de la subcuenca (mg P/L o ppm). (f. libre).
HLIFE_NGW	Vida media del nitrato en el acuífero superficial (días). (f. libre).
LAT_ORGN	Nitrógeno orgánico en el flujo base (mg/L) (0.0-200.0). (f. libre).
LAT_ORGP	Fósforo orgánico en el flujo base (mg/L) (0.0-200.0). (f. libre).
ALPHA_BF_D	Factor alfa de la curva de recesión del agua subterránea del acuífero profundo (1/días). (f. libre).

**Formato y variables requeridas por SWAT para las tablas de los cursos de agua principales y secundarios.**

De la base de datos original de SWAT se modificó la tabla \*.rte. Este archivo incluye los parámetros y características físicas de los cursos de agua de cada subcuenca. En la Tablas A2.4, se muestran los diferentes parámetros de la tabla *rte*.

## Anexos

Tabla A2. 4. Características físicas de los cursos de agua incluidas dentro de la tabla *rte* (Arnold *et al.*, 2011).

Columna	Descripción y formato
TITLE	Título. (a80)
CH_W	Ancho medio superior del canal (m). (f. libre).
CH_D	Profundidad desde el borde sup. al fondo del canal (m). (f. libre).
CH_S	Pendiente media del canal a lo largo del canal (m/m). (f. libre).
CH_L	Longitud del canal (km). (f. libre).
CH_N	Coefficiente de Manning del canal. (f. libre).
CH_K	Conductividad hidráulica efectiva (mm/h). (f. libre).
CH_COV1	Factor de erodabilidad del canal (0 no erosivo, 1 sin resistencia a la erosión). (f. libre).
CH_COV2	Factor de cobertura del canal (0 complet. protegido de la erosión por cobert. vegetal, 1 sin cobert. vegetal sobre el canal). (f. libre).
CH_WDR	Relación profundidad/ancho (m/m). (f. libre).
ALPHA_BNK	Factor alfa del flujo base para el banco de almac. (días). (f. libre).
ICANAL	Código de extracción de agua para riego desde el canal (0 sin riego, 1 riego). (f. libre).
CH_ONCO	Concentración del nitrógeno orgánico en el canal (ppm) (0.0-100.0). (f. libre).
CH_OPCO	Concentración del fósforo orgánico en el canal (ppm) (0.0-100.0). (f. libre).
CH_SIDE	Cambio en la distancia horizontal por unidad de distancia vertical (0.0-5.0). (f. libre).
CH_BNK_BD	Densidad aparente de los sedimentos del banco del canal ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) (1.1-1.9). (f. libre).
CH_BED_BD	Densidad aparente de los sedimentos del lecho del canal ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) (1.1-1.9). (f. libre).
CH_BNK_KD	Erodabilidad de los sedimentos del banco del canal mediante la prueba jet ( $\text{cm}^3/\text{N-s}$ ). (f. libre).
CH_BED_KD	Erodabilidad de los sedimentos del lecho del canal mediante la prueba jet (0.001 a $3.75 \text{ cm}^3/\text{N-s}$ ). (f. libre).
CH_BNK_D50	D50 diámetro de la partícula mediana del banco de sedimentos del canal ( $\mu\text{m}$ ) de 1 a 10000 $\mu\text{m}$ . (f. libre).
CH_BED_D50	D50 diámetro de la partícula mediana de los sedimentos del lecho del canal ( $\mu\text{m}$ ) de 1 a 10000 $\mu\text{m}$ . (f. libre).
CH_BNK_TC	Tc bank, esfuerzo cortante crítico del banco del canal ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).
CH_BED_TC	Tc bed, esfuerzo cortante crítico del lecho del canal ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).
CH_ERODMO	Valor seteado entre 0.0 y 1.0. e indica la no-erosividad del canal. (f6.2)
CH_EQN	Métodos de sedimentación (0 ecuación simplificada de Bagnold (default), 1 ecuación simplificada de Bagnold, 2 modelo de Kodatie, 3 modelo de Molinas y Wu, 4 modelo de Yang para arenas y gravas) (f. libre).

Anexos

### Anexo 3: Datos para calibrar y validar

Los datos observados de caudal, se emplearon con una resolución temporal diaria y mensual. Estos datos se ingresaron con el formato que requiere el programa SWAT-CUP. Los datos pueden presentar datos faltantes, aunque el número de fila también debe expresar que ese dato está ausente, es decir, si falta el día 2 la secuencia en las filas será 1, 3, 4,... La primera columna contiene la secuencia de números, desde el comienzo al fin de la simulación; la segunda presenta la fecha; por último, la tercera columna corresponde a la variable. Abajo, se muestra un ejemplo de datos diarios, en el recuadro se muestra un ejemplo de la secuencia a seguir en caso de existir datos ausentes.

1	FLOW_OUT_1_1979	12.7
2	FLOW_OUT_2_1979	14.9
3	FLOW_OUT_3_1979	20.8
5	FLOW_OUT_5_1979	10.5
6	FLOW_OUT_6_1979	10.4

### Anexo 4: Datos de contenido de agua en el suelo (Soil Water-SW)

Los archivos de salida de las subcuencas (.sub) contienen la información resumida de cada una de las subcuencas de la cuenca modelada. Los valores definitivos son el promedio de todas las HRUs presentes en cada subcuenca. El contenido de agua en el suelo o *soil water* (SW) en milímetros, es la cantidad de agua en el perfil del suelo al final de cada paso de simulación y a este valor se lo considera como humedad del suelo simulada (HSS). Abajo, en la Tabla A4.1 se muestra un ejemplo de los archivos extraídos en la simulación para la cuenca del río Arrecifes.

Tabla A4. 1. *Soil Water*.

SUB	YEAR	MON	SW (mm)
1	1982	1	203.6
2	1982	1	214.3
---	---	---	---
20	1982	1	185.7

Donde: SUB es subcuenca, YEAR es año, MON es mes y SW es altura de agua en el suelo (mm).

## Glosario y listado de símbolos elementales

### Glosario

Algunos términos empleados a lo largo de esta tesis son de uso común en el ámbito académico y técnico de la temática. Con todo, se ha elaborado una lista de los más importantes, para así dejar constancia de las definiciones concretas a las que hacen referencia determinados términos.

ACP: análisis de componentes principales

aHSS: anomalía de la humedad de suelo simulada

aNDVI: anomalía del índice de vegetación de diferencia normalizada

AVHRR: *Advanced Very High Resolution Radiometer*

CGIAR-CSI: *Consultative Group on International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information*

CN: curva número en la condición de humedad inicial II

*Cluster*: grupos

*Crop*: cultivos

EPIC: *Erosion Productivity Impact Calculator*

GIMMS: *Global Inventory Monitoring and Modelling Systems*.

GLCF: *Global Land Cover Facility*

HRU (*Hydrologic Response Units*): unidades de respuesta hidrológica

HSS: humedad de suelo simulada

IV: Índices de Vegetación

k-means: algoritmo de agrupamiento no-jerárquico

*lag*: retardo o atraso

LUC (*Land Use Classification*): tabla de categorías del uso del suelo

MDE: modelo digital de elevación

NASA: *National Aeronautics and Space Administration* de los Estados Unidos

NDMC: *National Drought Mitigation Center*

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*): índice de vegetación de diferencia normalizada

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NRCS: *Natural Resource Conservation Service*

NSE: coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe

*Outlier*: Un elemento de los datos que es significativamente diferente a los otros datos de la colección

pseudo-F: criterio para determinar el número óptimo de grupos k del método k-medias

R: coeficiente de correlación

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación

SCS: *Soil Conservation Service*

## Glosario y listado de símbolos

SIG: sistema de información geográfico

SIGA: Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico

SoilC: tabla de categorías de suelos

SPI (*Standardized Precipitation Index*): índice de precipitación estandarizado

SPI 1: índice de precipitación estandarizado de un mes

SPI 2: índice de precipitación estandarizado de tres meses

SPI 6: índice de precipitación estandarizado de seis meses

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

SUFI-2: *Sequential Uncertainty Fitting ver. 2*

Surlag: coeficiente de retención de agua

SW (*Soil wáter*): cantidad de agua en el perfil del suelo

SWAT (*The Soil and Water Assessment Tool*): herramienta para la evaluación del suelo y la tierra

tc: tiempo de concentración

*Urban*: uso de suelo urbanizado

**Listado de símbolos**

°C: grado centígrado

cm<sup>3</sup>: centímetro cúbico

gr: gramo

h: hora

ha: hectárea

kg: kilogramo

km: kilómetro

km<sup>2</sup>: kilómetro cuadrado

kPa: kilopascal

L: litro

m snm: metros sobre el nivel del mar

m: metro

m<sup>2</sup>: metro cuadrado

m<sup>3</sup>: metro cúbico

mg: miligramo

MJ: mega julio

mm: milímetro

s: segundo

ton: tonelada

## Referencias

**Referencias**

- Abbaspour, K. C. 2013. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Swiss: Eawag and Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 103 p.
- Abbaspour, K.C.; Johnson, A. y M.Th van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.
- Abbaspour, K.C.; Yang, J.; Maximov, I.; Siber, R.; Bogner, K.; Mieleitner, J.; Zobrist, J. y R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333, 413-430.
- Abbaspour, K. C. 2011. *SWAT-CUP 4: SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A User Manual*. Swiss: Eawag, 103 pp.
- Ameghino, F. 1884. “Las sequías y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires”. En: A. J. Torcelli. *Obras completas y correspondencia científica de Florentino Ameghino*. La Plata: La Plata Taller de Publicaciones Oficiales, 145-214 pp.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., y G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surface ground water flow model. *Journal of Hydrology*, 143(1-4), 47-69.
- Arnold, J. G., Kiriny, J. R.; Srinivasan, R.; Williams, J. R.; Haney, E. B. y S. L. Neitsch. 2011. *Soil and Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012*. Technical Report N° 439. Texas: Texas Water Resources Institute, 654 pp.
- Bajgirana, P. R.; Darvishsefatb, A.; Khalilic, A. y M. F. Makhdoum. 2008. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the northwest of Iran. *Journal of Arid Environments*, 72, 1086–1096.
- Barrios A. G. y L. A. Urribarri. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 11-29.
- Bates, B. C.; Kundzewicz, Z. W.; Wu, S. y J. P. Palutikof (Eds). 2008. “Climate change and water”. Technical Paper. En *Intergovernmental Panel on Climate Change*. [En línea] Geneva: IPCC Secretariat, 210 pp. Disponible en:

## Referencias

- [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_technical\\_papers.shtml#.UfPuEI3rxGg](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_technical_papers.shtml#.UfPuEI3rxGg) [Consulta realizada 10 de Enero de 2012]
- Bayarjargal, Y.; Karnieli, A.; Bayasgalan, M.; Khudulmur, S.; Gandush, C. y C. J. Tucker. 2006. A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 105, 9–22
- Bettolli, M. L.; Rivera, J. A. y O. C. Penalba. 2010. Regionalización de los días secos en argentina. Un enfoque metodológico. *Meteorológica*, 35(2), 67-80.
- Beven, K. y A. Binley. 1992. The Future of Distributed Models - Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279-298
- Bhuiyan, C.; Singh, R. P. y F. Kogan. 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (4), 289-302.
- Bono, A.; Alvarez, R. y N. Romano. 2010. Modelos de regresión sencillos para estimar el contenido de agua en todo el perfil usando la humedad superficial. *Informaciones Agronómicas*, 48, 11-13.
- Bouraoui, F. y T. A. Dillaha. 1996. ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), 493-502.
- Cabrera, A. L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 14,1-42.
- Calinski, R. B. y J. Harabasz. 1974. A dendrite method for cluster análisis. *Communications in Statistics*, 3, 1-27.
- Castañeda, M. y V. Barros. 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Centro de Economía Internacional. 2011. “Estadísticas del Mercosur: principales indicadores comerciales. Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, Buenos Aires, Argentina”. [En línea] Disponible en: <http://www.cei.gov.ar/index.asp> [Consulta realizada 10 de Diciembre de 2011].
- Chow, V. T.; Maidment, D. y L. Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. 13<sup>a</sup> Ed. Bogotá: McGraw-Hill, 584 pp.

## Referencias

- Chow V. T. 1994. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw–Hill, Trad. Saldarriaga, J., Bogotá, 667 p
- Darwin, C. 1845. *Viaje de un naturalista alrededor del mundo*. Ediciones AKAL. 2009. Vol I. 3ª Ed. Madrid: AKAL S. A., 644 pp.
- Das, H. P.; Adamenko, T. I.; Anaman, K. A.; Gommès, R. G. y G. Johnson. 2003. “Agrometeorology related to extreme events”. Nota Técnica N° 201. [En línea] Geneva: World Meteorological Organization N° 943, 152 pp. Disponible en: [http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_943.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_943.pdf) [Consulta realizada 20 de Enero de 2012]
- EASNE. 1972. Estudio de Aguas Subterráneas del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. La Plata: Consejo Federal de Inversiones.
- ESRI. 2013. “ArcGis Spatial Analyst: Desktop Help 10”. En *ArcGis Resource Center* [En línea] California: ESRI. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/005900000001000000/> [Con acceso 05-01-2013]
- Farr, T. G. y otros. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Reviews of Geophysics*, 45pp. Disponible en: [http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_paper.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf) [Con acceso 13-02-2013]
- Flamenco, E. 2012. *Elaboración de la curva H-Q para el río Arrecifes*. Informe inédito. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Gaspari, F. J., Vázquez, M., y J. Lanfranco. 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de La Plata*, 106 (1), 47-56.
- Gennero de Rearte, A. M y F. M. Graña. 2007. “Aglomeraciones productivas en el sector textil: una comparación de las regiones de Mar del Plata y Pergamino”. *I Jornadas Nacionales de Investigadores de las Economías Regionales*. Universidad Nacional De Entre Ríos y Otros, 13 al 14 de Septiembre de 2007, Concepción del Uruguay. Disponible en: <http://nulan.mdp.edu.ar/1035/1/00406.pdf> [Con acceso 13-02-2012].
- Giraut, M., Aguglino, R., Lupano, C., Bozzarello, E., Cornejo, J., y C. Rey. 2007. “Regiones hídricas superficiales de la provincia de Buenos Aires – Actualización cartográfica digital”. *XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*,

## Referencias

- Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina y Otros, 19 al 21 de septiembre de 2007, Mar del Plata.
- González Bonorino, F. 1965. Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 20(1), 67-148.
- Gonzalez, L. G. 2011. *Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas*. Tesis de Doctorado. Huelva: Universidad de Huelva, Departamento de Geodinámica y Paleontología.
- Gravelius, H. 1914. "Flusskunde". Berlin: Goschensche Verlagshan dlug. En: I. Zavoianu. 1985. *Morphometry of drainage basins*. 88-113 pp. Amsterdam: Elsevier.
- Haack, B. y S. Jampoler. 1995. Colour composite comparisons for agricultural assessments. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1589-1598.
- Hargreaves, G. H. y Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Heras, R. 1972. *Métodos prácticos para el estudio de aguas superficiales y subterráneas*. Publicación No. 85. Madrid: Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas.
- Horler, D. N. H. y F. J. Ahern. 1986. Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(3), 405-428.
- Horton, R. E. 1932. Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their grainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). 2011. "Censo de población, hogares y viviendas 2010". En *Censo 2010 Año del Bicentenario*. [En línea]. Disponible en: <http://www.censo2010.indec.gov.ar/> [Consulta realizada 30 de Diciembre de 2011]
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2009. "Cartas de suelos de la República Argentina – Provincia de Buenos Aires: Escala 1:50.000". En *Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria*. [En línea] Buenos Aires: Instituto de Suelos.

## Referencias

- Disponible en: <http://anterior.inta.gob.ar/f/?url=http://anterior.inta.gob.ar/suelos/>  
[Con acceso 15-04-2012].
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Programa de Cambio Rural (INTA-PCR).  
1997 a. *Guía práctica para el cultivo de Girasol*. 1ª Ed. Buenos Aires: Secretaría de  
Agricultura, Gandería, Pesca y Alimentación, INTA, 220 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Programa de Cambio Rural (INTA-PCR).  
1997 b. *Guía práctica para el cultivo de Maíz*. 1ª Ed. Buenos Aires: Secretaría de  
Agricultura, Gandería, Pesca y Alimentación, INTA, 220 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Programa de Cambio Rural (INTA-PCR).  
1997 c. *Guía práctica para el cultivo de Soja*. 1ª Ed. Buenos Aires: Secretaría de  
Agricultura, Gandería, Pesca y Alimentación, INTA, 243 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y Programa de Cambio Rural (INTA-PCR).  
1997 d. *Guía práctica para el cultivo de Trigo*. 1ª Ed. Buenos Aires: Secretaría de  
Agricultura, Gandería, Pesca y Alimentación, INTA, 182 pp.
- Jackson, R. D. y A. R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices. *Journal of Preventive  
Veterinary Medicine*, 11, 185-200.
- Jain, S. K.; Keshri, R.; Goswami A. y A. Sarkar. 2010. Application of meteorological and  
vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for Rajasthan,  
India. *Natural Hazards*, 54, 643–656.
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A. y E. Guevara. 2008. “Hole-filled SRTM for the globe  
Version 4”. En *CGIAR-CSI Database*. Washington DC: CGIAR-CSI. Disponible  
en: <http://srtm.csi.cgiar.org> [Con acceso 05-01-2012]
- Jha, M. K. 2012. “Quantifying Soil Moisture Distribution at a Watershed Scale”. En: M.  
Hernandez-Soriano (Ed.), *Soil Health and Land Use Management*. [En línea]  
Rijeka: InTech, 35-50 pp. Disponible en: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/25270/  
InTech-Quantifying\\_soil\\_moisture\\_distribution\\_at\\_a\\_watershed\\_scale.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/25270/InTech-Quantifying_soil_moisture_distribution_at_a_watershed_scale.pdf) [Con  
acceso 08-03-2012]
- Ji, L., y A. J. Peters. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great  
Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87,  
85-98.

## Referencias

- Kennedy, J. y R. C Eberhart. 1995. "Particle swarm optimization". *IV Proc. IEEE int'l conf. on neural networks*. IEEE service center, Piscataway, New Jersey, 1942-1948 pp.
- Kirpich, Z. P. 1940. Time of concentration of small watersheds. *Journal of Civil Engineering*, 10(6), 362
- Kuczera, G. y E. Parent. 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), 69-85.
- Lane, L. J. 1983. "Transmission losses". En: *National engineering handbook. Sect. 4. Hydrology*. Washington DC: USDA, SCS.
- Lencinas, J., y G. Díaz. 2011. Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM. *GeoFocus*, 11, 431-454. Disponible en: [http://geofocus.rediris.es/2011/Articulo18\\_2011.pdf](http://geofocus.rediris.es/2011/Articulo18_2011.pdf) [Con acceso 13-02-2013]
- Liu, W. T. y F. N. Kogan. 1996. Monitoring regional drought using vegetation condition index, int. *Journal of Remounted Sensing*, 17, 2761-2782.
- Lloyd-Hughes, B. y M. Saunders. 2002. A Drought Climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592.
- Losinno, B. N.; Sainato, C. M. y L. Giuffré. 2005. Propiedades edáficas y del agua subterránea. Riesgos de salinización y sodificación de los suelos, en la zona de Pergamino-Arrecifes (Prov. de Buenos aires, Argentina). *Revista Ciencia del Suelo*, 23, 17-58.
- Magrin, G. O., Travasso, M. I., López, G. M., Rodríguez, G. R., y A. R. LLoveras. 2007. "Vulnerabilidad de la Producción Agrícola en la Región Pampeana Argentina: Informe Final". [En línea]. Buenos Aires: Secretaria de Medio Ambiente de la Nación, 86 pp. Disponible en: <http://www.ambiente.gov.ar> [Consulta realizada 15 de Enero de 2012]
- Manuel-Navarrete, D., y otros. 2005. *Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias regionales extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas*. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Medioambiente y Desarrollo, Serie 118, 65 p.

## Referencias

- Marshall, L.; Nott, D. y A. Sharma 2004. A comparative study of Markov chain Monte Carlo methods for conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, 211(1-4), 69-85.
- Mavi, S. H. y G. J. Tupper. 2004. *Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture*. New York: Food Products Press, 364 pp.
- McCarthy G.T. 1938. "The unit hydrograph and flood routing". *Conference of the North Atlantic Division*, U.S. Army Corps of Engineers, 24 de Junio de 1938, New London.
- McKay, M. D.; Beckman, R. J. y W. J. Conover. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21, 239-245.
- McKee, T. B.; Doesken, N. J. y J. Kleist. 1993. "The relationship of drought frequency and duration to time scales". *Proceeding Soft. the 8th Conference on Applied Climatology*. AMS, 17-22 January 1993, Anaheim, California, 179–184 pp.
- Michelena, R. O.; Irurtia, C. B.; Pittaluga, A.; Vavruska, F. y M. E. B de Sardi. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la pampa ondulada. *Ciencia del Suelo*, 6(1), 60-66.
- Milligan, G. W. y M. C. Cooper. 1985. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika*, 50, 159-179.
- Ming Xing, L.; Zhu Guo, M. y D. JiWen. 2010. Regional soil moisture simulation for Shaanxi province using SWAT model validation and trend analysis. *Journal of Science China Earth Sciences*, 53(4), 575-590.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP). 2011. *Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario. Argentina*. 1ª Ed. Coordinado por Sandra E. Occhiuzzi; Pablo Mercuri; Carla Pascale. Buenos Aires: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 130 pp.
- Mishra A. K.; Singh V. P. y V. R. Desai. 2007. Drought characterization: a probabilistic approach. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(1), 41–55.

## Referencias

- Moncaut, C. A. 2003. “Inundaciones y sequías tienen raíces añejas en la pampa bonaerense (1576-2001)”. En: Maiola, O., Gabellone, N., y M. Hernández (Eds.). *Inundaciones en la región pampeana*. La Plata: UNLP, 27-47 pp.
- Monireh, F.; Abbaspour, K. C.; Schulin, R. y H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23, 486–501.
- Monteith J. L. 1965. “Evaporation and the environment”. En: G.E. Fogg (Ed.). *19th Symposia of the Society for experimental Biology*. 205-234 pp. New York: The State and Movement of Water in Living Organisms, Cambridge Univ. Press.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. y T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Narasimhan, B. 2004. *Development of indices for agricultural drought monitoring using a spatially distributed hydrologic model*. Philosophy Doctor Dissertation. College Station, Texas: Universidad de Texas A&M.
- Narasimhan B., Srinivasan R., Arnold J. G. y M. Di Luzio. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Journal of American Society of Agricultural Engineers*, 48(3): 1101–1113
- NASA Landsat Program. 2003. “Landsat ETM+. SLC-Off”. En *Global Land Cover Facility, Landsat* [En línea] Sioux Falls: USGS. Disponible en: <http://glcf.umd.edu/data/landsat/> [Con acceso 05-08-2011]
- Nash, J. E. y J. V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Naumann G. 2009. *Variabilidad intraestacional de alta y baja frecuencia de la temperatura máxima y mínima diaria en Sudamérica. Estudio de la predictabilidad mediante la entropía condicional*. Tesis Doctoral. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. y J. R. Williams. 2011. “Soil and water assessment tool. Theoretical documentation: version 2009”. Reporte Técnico N° 406. [En línea] College Station, Texas: Texas Water Resources Institute, Texas

## Referencias

- A&M University, 647 pp. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/documentation/> [Con acceso 10-01-2012]
- Núñez, S.; Núñez, L.; Podestá, G. y M. Skansi. 2005. “El índice estandarizado de precipitación como herramienta para la caracterización y el concepto de la sequía: una prueba de concepto”. *9th Argentine Congress of Meteorology*. Centro Argentino de Meteorólogos, 3 al 7 de Octubre de 2005, Buenos Aires. Disponible en: <https://www.rsmas.miami.edu/users/agriculture/pubs/meetings/abstracts/SPI-SMN.pdf> [Con acceso 08-02-2012]
- Ortiz, L. M. 2011. *Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación en distintas regiones climáticas de México (1982-2006)*. Tesis de Maestría. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Palmer W. C. 1965. *Meteorological drought*. Washington D.C: U. S. Department of Commerce, 45, 58 pp.
- Palmer W. C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nation wide: the Crop Moisture Index. *Weatherwise*, 21, 156–161.
- Pérez Ballari, A.; Botana, M. I. y O. Scarpati. 2009. Distribución de las sequías e identificación de áreas de riesgo (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Huellas*, 13: 130-146.
- Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. y W. T. Vetterling. 1992. *Numerical Recipe. The Art of Scientific Computation*. 2<sup>a</sup> Ed. Great Britain: Cambridge University Press, Cambridge.
- Priestley, C. H. B. y R. J. Taylor. 1972. On the Assessment of the Surface heat Flux and Evaporation using Large-scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
- Quiring, S. M. y T. N. Papakryiakou. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian Prairies. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 118, 49–62.
- Ravelo, A. C.; Da Porta, W. A. y R. E. Zanvettor. 1999. “Evaluación de las sequías extremas en la región pampeana argentina durante el período 1930–1990”. XI Congreso Brasileiro de Agrometeorología, II Reunión Latino-Americana de Agrometeorología. Florianopolis, SC Brasil, 19 al 22 de Julio de 1999.

## Referencias

- Raziei, T.; Bordi, I. y L. S. Pereira. 2008. A precipitation-based regionalization for Western Iran and regional drought variability. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 12, 1309-1321.
- Red de Información Agropecuaria Nacional (RIAN). 2012. “Información de seguimiento de sistemas productivos: estado de los cultivos”. En *Red de información agroeconómica para la región pampeana* [En línea] Buenos Aires: Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. Disponible en: <http://rian.inta.gov.ar> [Con acceso 13-05-2012].
- Ricahrd, J.; Madramootoo, C. y A. Trotman. 2010. “The development of the SPI and NDVI for 3 study sites in Jamaica, with an investigation into their use in understanding soil water during water stressed conditions in Jamaica”. *XVII<sup>th</sup> World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*, Canadian Society for Bioengineering, Quebec, 13-17 de Junio de 2010. Disponible en: [http://www.mcgill.ca/files/cariwin/CEF2010\\_Richards\\_SPI\\_NDVI\\_paper.pdf](http://www.mcgill.ca/files/cariwin/CEF2010_Richards_SPI_NDVI_paper.pdf) [Consulta realizada 15 de Junio de 2013]
- Richard, J. 2010. *Drought assessment tools for agricultural water management in Jamaica*. Master Thesis. Quebec, Canada: McGill University, Department of Bioresource Engineering.
- Ritchie, J. T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Journal of Water Resources Research*, 8, 1204-1213.
- Rulinda, C. M.; Dilo, A.; Bijker, W. y A. Steina. 2012. Characterising and quantifying vegetative drought in East Africa using fuzzy modelling and NDVI data. *Journal of Arid Environments*, 78, 169-178.
- Schnur, M. T.; Xie, H. y X. Wang. 2010. Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. *Ecological Informatics*, 5, 400–409.
- Schuol, J. y K. C. Abbaspour. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Advances in Geosciences*, 9, 137–143.
- Seiler, R. A. y F. Kogan. 2002. Monitoring Enso cycles and their impacts on crops in Argentina from NOAA-AVHRR satellite data. *Journal of Advances in Space Research*, 30 (11), 2489-2493.

## Referencias

- Seiler, R. A.; Kogan, F. y G. We. 2000. Monitoring weather impact and crop yield from NOAA-AVHRR data in Argentina. *Journal of Advances in Space Research*, 26 (7), 1177-1185.
- Seiler, R. A.; Kogan, F. y J. Sullivan. 1998. AVHRR-Based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Journal of Advances in Space Research*, 21 (3), 481-484.
- Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS). 2006. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. 10a Ed. Washington DC: USDA-NRCS, 331 pp.
- Shafer B. A y L. E. Dezman. 1982. “Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas”. *Proceedings of the Western Snow Conference*. Colorado State University, April de 1982, Fort Collins, Colorado, 164–175 pp.
- Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico (SIGA). 2012. “Sistema de información y gestión agrometeorológico de INTA: reportes estadística”. En *SIGA* [En línea] Buenos Aires: Instituto de Clima y Agua, INTA. Disponible en: <http://siga2.inta.gov.ar/en/> [Con acceso 15-03-2012].
- Sistema Integrado de Información Agropecuarias (SIIA). 2012. “Agricultura”. En *Sistema Integrado de Información Agropecuarias* [En línea] Buenos Aires: MAGyP. Disponible en: <http://dev.sii.gov.ar/series> [Con acceso 10-03-2012].
- Sivakumar Mannava, V. K.; Motha, R. P. y P. Das Haripada (Eds.). 2005. *Natural disasters and extreme events in agriculture, impacts and mitigation*. Berlin: Springer, 367 pp.
- Skansi, M. M.; Núñez S.; Berríos Cáceres, S. y G. P. Podestá. 2006. “Un nuevo producto operacional para monitorear la ocurrencia y duración de períodos secos y húmedos usando el índice de precipitación estandarizado”. *XI Reunión Argentina de Agrometeorología*. Universidad de La Plata, 6 al 8 de Septiembre de 2006, La Plata. Disponible en: [http://yyy.rsmas.miami.edu/groups/agriculture/pubs/meetings/abstracts/ArgAgromet2006\\_Skansi\\_et\\_al.pdf](http://yyy.rsmas.miami.edu/groups/agriculture/pubs/meetings/abstracts/ArgAgromet2006_Skansi_et_al.pdf) [Con acceso 08-02-2012]
- Soil Conservation Service (SCS). 1972. “Section 4: Hydrology”. En: U.S. Dept. of Agriculture. *National Engineering Handbook*. Washington DC, U.S. Govt. Print. Off., 762 pp.

## Referencias

- Soil Conservation Service (SCS). 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55. Washington D.C.: U.S. Dept. of Agriculture.
- Strahler, A. N. 1952. Dynamic basis of geomorphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63, 923-938.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH). 2010. “Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina – Versión 2010”. [CD-Rom], Buenos Aires: SSRH de la Nación.
- Tarpley, J.; Schneider, S. y R. Money. 1984. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 23, 491-494.
- Tucker, C. J. y A. Anyamba. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, 63, 596–614.
- Tucker, C. J. y J. B. Choudhury. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 23, 243-251.
- Tucker, C. J.; Pinzon, J. E. y M. E. Brown. 2004. *Global inventory modeling and mapping studies*. College Park, Maryland: Global Land Cover Facility, University of Maryland. Disponible en: <http://glcf.umd.edu/data/gimms/> [Con acceso 05-01-2012].
- Unganai, L. S. y F. N. Kogan. 1998. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. *Journal of Remote Sensing Environment*, 63, 219–232.
- Van Griensven, A. and T. Meixner. 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Science and Technology*, 53 (1), 51–59.
- Vieux Inc. 2010. “Vieux Inc: GIS hydrology and radar rainfall”. En *Vieux Inc*. [En línea]. Disponible en: <http://www.vieuxinc.com/vflo.html> [Con acceso 05-01-2012].
- Viglizzo, E. F., Roberto, Z. E., Filippin, M. C. y A. J. Pordomingo. 1995. Climate variability and agroecological change in the central pampas of Argentina. *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment*, 55, 7-16.
- Vrugt, J. A.; Gupta, H. V.; Bouten, W. y S. Sorooshian. 2003. “A shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithm for Estimating Posterior Distribution of Watershed

## Referencias

- Model Parameters”. En: Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, H. V.; Rousseau, A. N. y R. Turcotte. *Calibration of Watershed Models*. Washington DC: AGU.
- Wang, X.; Xie, H.; Guan, H. y X. Zhou. 2007. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology*, 340, 12–24.
- Wang, Z. 1990. “Principles of Photogrammetry (with Remote Sensing)”. En: ERDAS. 2010. *ERDAS Field Guide*. USA: ERDAS Inc.
- Weiss, J. L.; Gutzler, D. S.; Allred Coonrod, J. E. y C. N. Dahm. 2004. Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 58, 249–272.
- William, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 12(1), 100-103 pp.
- Williams, J. R. 1992. *WXPARM: Weather parameter calculator for EPIC. User Manual*. Texas: U.S. Department of Agriculture, Grassland Soil and Water Research Laboratory, 6 pp.
- Yang, J.; Abbaspour K. C.; Reichert P. y H. Yang. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1-2), 1-23.
- Yang, J.; Reichert, P.; Abbaspour, K. C. y H. Yang. 2007. Hydrological Modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical Model Formulation and Bayesian Inference. *Journal of Hydrology*, 340: 167-182.
- Yi-Ju, C.; Dar-Yuan, L.; Horng-Yuh, G. y H. Kun-Huang. 1997. Geostatistical Analysis of Soil Properties of Mid-West Taiwan Soils. *Soil Science*, 162, 291-298.
- Young, R. A.; Onstad, C. A.; Bosch, D. D. y W. P. Anderson. 1987. *AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model: a watershed analysis tool*. USDA, Conservation Research Report 35.