
FICH

UNL

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

MAESTRIA EN INGENIERIA DE LOS RECURSOS HIDRICOS

*“Efectos hidrológicos del cambio de uso del suelo en el Litoral
Argentino. Estudio de caso: cuenca del A° Feliciano
(Provincia de Entre Ríos)”*

Ing. María Alejandra Arbuet Moraes

DIRECTOR: Dr. Raúl Pedraza

CO-DIRECTORA: MSc. Graciela Pusineri



A° Feliciano en Paso Quebracho (1940)

SANTA FE – ARGENTINA

Diciembre 2009

Certificación del Jurado de Tesis y del director de Tesis

DECLARACION 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:

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink. The signature is cursive and appears to be the name of the author.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de Tesis Dr. Raúl Pedraza y MSc. Graciela Pusineri, que compartieron sus conocimientos, sus propuestas y por el apoyo y la confianza que siempre me brindaron.

A Mario Schreider y Cristóbal Lozeco, que me incentivaron y alentaron a realizar y finalizar esta Maestría.

A Julio García Arroyo, por su aliento constante y la entrega de la foto de tapa, realizada por su padre en el año 1940.

A Héctor Casas de la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos, por la información Hidrometeorológica suministrada.

A Armando Brizuela y Griselda Carñel, docentes de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNER, por las imágenes satelitales entregadas.

A Ernesto Barrionuevo, del INTA Castelli, por el contacto y trámite de solicitud de imágenes al INPE.

A Daniela Girolimetto, mi compañera de estudios, por su linda y franca amistad.

A mi familia y amigos, Julio, familias Doldan, Jacob, Lozeco y Martinez que siempre están a mi lado.

*Dedico este trabajo a Necha y Morocho,
mis padres, que nunca dejan de cuidarme.*

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE TABLAS.....	v
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO.....	4
3.1. UBICACIÓN.....	4
3.2. RED HIDROGRÁFICA.....	5
3.3. RELIEVE Y FORMA	7
3.4. CLIMA.....	7
3.5. PLUVIOMETRÍA.....	8
3.6. HIDROMETRÍA.....	9
3.7. SUELOS.....	10
3.8. VEGETACIÓN.....	12
3.9. CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.....	13
CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE	19
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA APLICADA.....	25
5.1. ASPECTOS GENERALES.....	25
5.2. MODELO KINEROS2.....	26
5.3. PROGRAMA AGWA.....	33
5.4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN Y RED DE DRENAJE	44
5.5. MAPA DE SUELOS.....	47
5.6. MAPAS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO.....	49
CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO.....	54
6.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN Y RED DE DRENAJE	54
6.2. MAPA DE SUELOS.....	61
6.3. MAPAS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO.....	62
6.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO	70
CAPÍTULO 7: CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO.....	73
7.1. EVENTO DE ABRIL DE 1986	74
7.2. EVENTO DE ABRIL DE 1996	78
7.3. EVENTO DE FEBRERO DE 2005.....	81
7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
CAPÍTULO 8: EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO ENTRE ESCENARIOS	87
8.1. ANÁLISIS A ESCALA DE LA CUENCA TOTAL.....	87
8.2. ANÁLISIS A ESCALA LOCAL	88

CAPÍTULO 9: EFECTOS DE CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO SOBRE LA ESCORRENTÍA Y LOS CAUDALES MÁXIMOS.....	91
9.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	91
9.2. TORMENTA SINTÉTICA ADOPTADA	91
9.3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS PARA LOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO DE 1986, 1997 Y 2006.....	92
9.4. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS PARA ESCENARIOS HIPOTÉTICOS FUTUROS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO DE LA SUBCUENCA 253.....	97
9.5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE DERRAME DE LA CUENCA.....	100
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS	106
ANEXOS.....	113
ANEXO I: APLICACIÓN DEL MODELO CHAC.....	1
ANEXO II: PRIMER INVENTARIO NACIONAL DE BOSQUES NATIVOS	10
ANEXO III: ÁREAS PROTEGIDAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS.....	12
ANEXO IV: TASAS DE INFILTRACIÓN EN UN SUELO MOLISOL Y VERTISOL.....	14
ANEXO V: DELIMITACIÓN DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS	16
ANEXO VI: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXISTENTES	19
ANEXO VII: CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA Y ATMOSFÉRICA	23
ANEXO VIII: CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS EXISTENTES.....	24
ANEXO IX: MATRICES DE CONTIGENCIA	31
ANEXO X: TABLAS DE ATRIBUTOS DE LOS SHAPEFILE	32
ANEXO XI: ARCHIVO DE PRECIPITACIONES (*.pre)	41
ANEXO XII: ARCHIVO DE PARÁMETROS (*.par) CREADO CON EL MODELO AGWA – KINEROS2..	45
ANEXO XIII: ARCHIVO DE SALIDA (*.out) DEL MODELO AGWA – KINEROS2	47

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 3.1: Ubicación de la cuenca del A° Feliciano.....	4
Figura N° 3.2: Ubicación de las principales localidades e infraestructura vial.....	5
Figura N° 3.3: Red de drenaje de la cuenca del A° Feliciano hasta Paso Medina.	6
Figura N° 3.4: Curva hipsométrica de la cuenca en estudio (fuente: Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos).....	7
Figura N° 3.5: Ubicación de las estaciones pluviométricas.....	9
Figura N° 3.6: Caudales medios diarios del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH). .	10
Figura N° 3.7: Mapa de suelos de la cuenca en estudio (Fuente Atlas de Suelos de la República Argentina – INTA).....	11
Figura N° 3.8: Ubicación de la región del Espinal y sus distritos Espinal, Ñandubay y Caldén. (Fuente: PBNyAP , SAyDS y DB, 2007).	12
Figura N° 3.9: Evolución de la superficie total sembrada en Entre Ríos (período 1997/2006) (Fuente: SAGPyA)	16
Figura N° 3.10: Evolución de la superficie sembrada en Entre Ríos por cultivo (período 1986/2006) (Fuente: Bolsa de Cereales de Entre Ríos. Proyecto Siber).....	17
Figura N° 3.11: Evolución de la superficie sembrada de soja en Entre Ríos 1986-2006.....	17
Figura N° 3.12: Superficie destinada al cultivo de soja durante la campaña 2006/07	18
Figura N° 5.1: Desagregación de una cuenca elemental.....	27
Figura N° 5.2: Esquema del método de diferencias finitas aplicado.	29
Figura N° 5.3: Capacidad de infiltración escalada en función de la infiltración acumulada escalada.....	32
Figura N° 5.4: Menú principal del AGWA Tools.....	35
Figura N° 5.5: Esquema del proceso de delineación de la cuenca.....	36
Figura N° 5.6: Esquemización para el cálculo de las longitudes de subcuencas (Fuente: Manual del AGWA 1.5)	38
Figura N° 5.7: Esquema del proceso de parametrización de suelos.....	39
Figura N° 5.8: Vista del menú para aplicar multiplicadores.....	43
Figura N° 5.9: Algoritmo de ocho direcciones (Fuente: Olivera, 2006).....	46
Figura N° 5.10: Esquemas de mapas raster de dirección de flujo y de flujo acumulado (Fuente: Olivera, 2006).47	
Figura N° 5.11: Triángulo de textura de suelos USDA	48
Figura N° 6.1: Digitalización de las curvas de nivel y puntos acotados a) Carta topográfica IGM georeferenciada, b) Unión de las cartas utilizadas.....	54
Figura N° 6.2: Resultado completo de la digitalización en formato de puntos.....	55
Figura N° 6.3: Cuadro de diálogo de Surfer 8 para la interpolación.....	56
Figura N° 6.4: Visualización de las imágenes obtenidas con los métodos de interpolación.....	57
Figura N° 6.5: Mapa raster del Modelo Digital de Elevación.....	59
Figura N° 6.6: Digitalización del A° Feliciano sobre la imagen digital.....	60
Figura N° 6.7: Mapa raster de dirección de flujo.....	60
Figura N° 6.8: Mapa raster de flujo acumulado.....	61

Figura N° 6.9: Mapa de suelos con la clasificación FAO	62
Figura N° 6.10: Firmas espectrales de las clases identificadas para la imagen del 2006	65
Figura N° 6.11: Imagen Falso Color Mejorado RGB 453 de Abril/2006	66
Figura N° 6.12: Imagen clasificada con 8 clases de Abril/2006	66
Figura N° 6.13: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 1986	68
Figura N° 6.14: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 1997	68
Figura N° 6.15: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 2006	69
Figura N° 6.16: Límites de cuenca y subcuencas generados por AGWA-KINEROS	70
Figura N° 7.1: Polígonos de Thiessen para el evento de abril de 1986.....	75
Figura N° 7.2: Mapa de isohietas de lluvia total del evento de abril de 1986.....	76
Figura N° 7.3: Hidrogramas observado y simulado del evento de abril de 1986.....	76
Figura N° 7.4: Caudales máximos y escorrentía simulados del evento de abril de 1986.....	78
Figura N° 7.5: Polígonos de Thiessen para el evento de abril de 1996.....	79
Figura N° 7.6: Isohietas de lluvia total del evento de abril de 1996	79
Figura N° 7.7: Hidrogramas observado y simulado del evento de abril de 1996.....	80
Figura N° 7.8: Caudales máximos y escorrentía simulados del evento de abril de 1996.....	81
Figura N° 7.9: Polígonos de Thiessen para el evento de febrero de 2005	82
Figura N° 7.10: Isohietas de lluvia total del evento de febrero de 2005	83
Figura N° 7.11: Hidrogramas observado y simulado del evento de febrero de 2005	83
Figura N° 7.12: Caudales máximos y escorrentía simulados del evento de febrero de 2005	85
Figura N° 8.1: Mapa de cambios de la clase Bosque+monte+pastura entre los años 1986 y 2006	88
Figura N° 8.2: Mapa de usos/coberturas del suelo de la subcuenca 253 correspondiente al escenario 1986	89
Figura N° 8.3: Mapa de usos/coberturas del suelo de la subcuenca 253 correspondiente al escenario 2006	90
Figura N° 9.1: Hietograma de la tormenta sintética.....	92
Figura N° 9.2: Hidrogramas simulados en Paso Medina para la tormenta sintética y los escenarios de uso/cobertura del suelo considerados	93
Figura N° 9.3: Caudales máximos y escurrimientos simulados para la tormenta sintética y el escenario de 1986	93
Figura N° 9.4: Caudales máximos y escurrimientos simulados para la tormenta sintética y el escenario de 2006	94
Figura N° 9.5: Coeficientes de escorrentía para el escenario 1986.....	95
Figura N° 9.6: Coeficientes de escorrentía para el escenario 2006.....	95
Figura N° 9.7: Hidrogramas obtenidos en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados	97
Figura N° 9.8: Hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo de 1986 e hipotéticos	98
Figura N° 9.9: Coeficiente de escorrentía de la subcuenca 253 en función del porcentaje de superficie con uso agrícola	99
Figura N° 9.10: Coeficientes de derrame anual en función de las precipitaciones anuales en la cuenca en estudio	101

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1: Localidades de la zona de estudio	5
Tabla N° 3.2: Afluentes del A° Feliciano hasta paso Medina.....	6
Tabla N° 3.3: Valores medios de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa en la estación Concordia Aero (1981-1990).	8
Tabla N° 3.4: Estaciones pluviométricas consideradas en este estudio	8
Tabla N° 3.5: Caudales mensuales y anuales del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH)	9
Tabla N° 3.6: Escurrimientos anuales, caudales específicos anuales y caudales diarios máximos y mínimos del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH)	10
Tabla 3.7: Clases de suelos en la cuenca del A° Feliciano (Fuente Atlas de Suelos de la República Argentina – INTA).....	11
Tabla N° 3.8: Superficies por clase de cobertura del Distrito Ñandubay en Entre Ríos (Fuente: PBNyAP , SAyDS, DB Informe Regional Espinal-Segunda Etapa-2007).....	15
Tabla N° 5.1: Tipo de información necesaria para el modelo AGWA- KINEROS2.....	34
Tabla N° 5.2: Parámetros calculados en el shapefile subcuenca en la delineación de la cuenca	37
Tabla N° 5.3: Parámetros calculados en el shapefile canal en la delineación de la cuenca.	37
Tabla N° 5.4: Parámetros calculados en el shapefile subcuenca en la parametrización de la cuenca, uso del suelo y tipo de suelo	40
Tabla N° 5.5: Resultados obtenidos de la simulación para cada tipo de segmento.....	43
Tabla N° 5.6: Longitudes de onda de las bandas utilizadas en el trabajo.	49
Tabla N° 6.1: Cartas topográficas utilizadas (fuente: IGM)	54
Tabla N° 6.2: Estadísticos de los errores de cada método de interpolación.....	58
Tabla N° 6.3: Atributos de la tabla del mapa de suelo de la cuenca en estudio con la clasificación FAO	61
Tabla N° 6.4: Coordenadas de los vértices de la ventana de trabajo.....	63
Tabla N° 6.5: Clases de uso/cobertura del suelo.....	64
Tabla N° 6.6: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 11/01/1986.....	67
Tabla N° 6.7: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 30/04/1997.....	69
Tabla N° 6.8: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 24/04/2006.....	70
Tabla N° 6.9: Parámetros calculados en el shapefile cuenca	71
Tabla N° 6.10: Parámetros modificados en el shapefile del canal.	71
Tabla N° 6.11: Valores de la tabla Nalc_feliciano.....	72
Tabla N° 7.1: Parámetros de los eventos estudiados.....	73
Tabla N° 7.2: Datos de lluvia del evento de abril de 1986	74
Tabla N° 7.3: Parámetros de calibración del evento de abril de 1986	77
Tabla N° 7.4: Datos de lluvia del evento de abril de 1996	78
Tabla N° 7.5: Parámetros de calibración del evento de abril de 1996	80
Tabla N° 7.6: Datos de lluvia del evento de febrero de 2005	82
Tabla N° 7.7: Parámetros de calibración del evento de febrero del 2005	84

Tabla N° 7.8: Caudales máximos y escurrimientos observados y simulados	85
Tabla N° 7.9: Valores medios de los parámetros de cobertura para la cuenca del A° Feliciano.....	86
Tabla N° 8.1: Distribución de la superficie de la cuenca del A° Feliciano para las clases de uso/cobertura reagrupadas.....	87
Tabla N° 8.2: Distribución de la superficie de la subcuenca 253 para las clases de uso/cobertura reagrupadas ...	89
Tabla N° 9.1: Tormenta sintética.	92
Tabla N° 9.2: Parámetros de hidrogramas simulados en Paso Medina para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados	92
Tabla N° 9.3: Parámetros de hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados.....	96
Tabla N° 9.4: Parámetros de hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios 1986, EH1 y EH2.....	98
Tabla N° 9.5: Variación del coeficiente de escorrentía de la subcuenca 253 para distintos escenarios de usos/coberturas del suelo.....	100
Tabla N° 9.6: Valores del coeficiente de derrame anual en la cuenca del A° Feliciano.	100

RESUMEN

Se investigaron los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos), por medio de la aplicación del modelo AGWA- KINEROS2 en el entorno del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView 3.2. El análisis se realizó para 2 escalas espaciales: la cuenca total (5.541 km²) y la subcuenca 253 (138 km²), una de las más intervenidas.

Se elaboraron los datos básicos requeridos para la aplicación del modelo, como el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca, el mapa de suelos y mapas de usos/coberturas del suelo para tres escenarios (1986, 1997 y 2006), utilizando técnicas de SIG y teledetección. Para estos últimos, se procesaron 3 imágenes satelitales representativas de dichos escenarios y se aplicó una clasificación específica para esta Tesis.

Se implementó el modelo a la cuenca en estudio para cada uno de los escenarios, a partir de los datos básicos previamente elaborados.

Se calibró el modelo para cada uno de los escenarios. Para ello, se seleccionaron tres eventos precipitación-escorrentía observados en la cuenca en estudio, de similar magnitud, cada uno ocurrido durante uno de los escenarios. Los resultados obtenidos muestran una disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo media areal (KS) para los escenarios 1997 y 2006 respecto del escenario de 1986. La disminución de KS puede interpretarse físicamente como la consecuencia de un proceso de destrucción de la estructura de los suelos destinados a uso agrícola.

Se evaluaron los cambios de usos/coberturas del suelo entre 1986 y 2006, encontrándose un aumento de la superficie agrícola en detrimento de bosques y montes. Para la cuenca total, la disminución de la superficie de Bosque y Monte representa el 6,5 % de la superficie total. Para la subcuenca 253, la disminución representa el 15 % de la superficie de dicha subcuenca. Los resultados obtenidos indican que la mayor parte de los cambios se produjeron sobre suelos Vertisoles y Molisoles. Estos suelos se caracterizan por un alto contenido de arcillas, ocupan el 50% de la superficie total de la cuenca y se desarrollan en zonas próximas a la red de drenaje

Se evaluaron los efectos de los cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos. Para ello, se aplicó el modelo calibrado para cada escenario considerando como entrada una única tormenta sintética. Se encontró un aumento general de la escorrentía y de los caudales máximos al pasar del escenario de 1986 al de 2006, lo que es coherente con la disminución de KS para este último. A la escala de la subcuenca 253, la escorrentía aumentó un 55% y el caudal máximo, un 28%.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el aumento de la superficie agrícola en detrimento de bosques y montes registrado en la cuenca en el período 1986/2006, ha originado un aumento tanto de la escorrentía como de los caudales máximos. Estos aumentos se explican principalmente por la baja a muy baja resistencia a la erosión de los suelos Vertisoles y Molisoles cuando son sometidos a uso agrícola. Este uso les provoca pérdida de materia orgánica, erosión y una destrucción de la estructura, originando una disminución de sus conductividades hidráulicas. En consecuencia, bajo uso agrícola, estos suelos tienen coeficientes de escorrentía próximos a la unidad después de un humedecimiento prolongado.

Se calcularon los valores anuales del coeficiente de derrame de la cuenca en estudio para las últimas décadas. Los resultados obtenidos indican un aumento del potencial de escurrimiento de los suelos en los últimos años, lo que es coherente con los resultados obtenidos de la simulación.

ABSTRACT

The effects of changes in land use and cover on direct runoff and maximum flows of Feliciano stream basin (Entre Ríos province) were studied by applying the AGWA-KINEROS2 model in the ArcView 3.2 Geographic Information System (GIS) environment. The analysis was carried out for two spatial scales: overall basin (5,541 km²) and sub-basin 253(138 km²), which was one of the most intervened.

In order to apply the model, the required basic data, such as basin's DEM (Digital Elevation Model), soil map and land use/cover maps, were developed for three scenarios (1986, 1997 and 2006) by using SIG and remote sensing techniques. For the latter techniques, in particular, three satellite images representing the scenarios were processed and classified according to specific parameters designed for this thesis.

From the developed basic data, the model was applied to the study basin for each of the three scenarios, being also calibrated for each scenario.

Three rainfall-runoff events observed in the study basin, similar in magnitude and each one occurring during each scenario were selected for the calibration. The results show a decrease in the average soil saturated hydraulic conductivity (KS) for scenarios 1997 and 2006 compared to that of 1986. KS decrease can be physically understood as a consequence of a destruction process taking place in the structure of soils used for agricultural production.

Changes in land use and cover occurring between 1986 and 2006 were evaluated, an increase in agriculture surface being found in detriment of woodlands and forests. For the overall basin, the decrease in Woodland and Forest surface represents 6.5% of the total surface. In the case of the sub-basin 253, this decrease represents 15% of the sub-basin surface. Results show that most of the changes took place on Vertisol and Molisol soils. These soil types are characterized by high clay content, represent 50% of the total basin surface and can be found in zones close to the drainage net.

The effects of changes in land use and cover on direct runoff and maximum flows were also evaluated. For that purpose, a model calibrated for each scenario was applied, the same synthetic storm being considered as input. A general increase in runoff and maximum flows was found when considering 1986 and 2006 scenarios, which is consistent with the KS decrease occurring in the last scenario. At sub-basin 253 scale, runoff and maximum flow showed an increase of 55% and 28%, respectively.

It is concluded that the increase in agriculture surface in detriment of woodlands and forests taking place in the basin in the period 1986-2006 has led to an increase both in runoff and maximum flows. These increases are mainly explained by low to very low resistance to erosion of Vertisol and Molisol soils when they are used for agriculture production. This use leads to the loss of organic matter, erosion and structure destruction, which in turn leads to a decrease in hydraulic conductivities. As a result, when these soils are used for agriculture, they show runoff coefficients close to one after a long humidity period.

Annual discharge coefficient values of the study basin were calculated for the last decades. Results show an increase of soil runoff potential in the last years, which is consistent with the results obtained in the simulation.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la región Litoral Argentina está experimentando una expansión de la superficie agrícola en detrimento de bosques, montes y pasturas naturales. En particular, en la Provincia de Entre Ríos ha aumentado notablemente la superficie cultivada en los últimos 20 años.

En esta Tesis se investigaron los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos), por medio de la aplicación del modelo AGWA-KINEROS2 (Automated Geospatial Watershed Assessment - Kinematic Runoff and Erosion) en el entorno del SIG ArcView 3.2. El análisis se realizó para 2 escalas espaciales, a la escala de la cuenca total y a la escala local de la subcuenca 253, una de las más intervenidas

Para la aplicación del modelo se elaboró el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca, el mapa de suelos y mapas de usos/coberturas del suelo para los escenarios de 1986, 1997 y 2006, utilizando técnicas de SIG y teledetección.

En el *Capítulo 2* se plantean los objetivos de esta Tesis.

En el *Capítulo 3* se presentan las principales características de la cuenca en estudio, su hidrografía, relieve, clima, suelos, vegetación, así como la información pluviométrica e hidrométrica utilizada en este trabajo. Finalmente, se exponen los cambios de usos/coberturas del suelo registrados en la Provincia de Entre Ríos en las últimas décadas.

En el *Capítulo 4* se describe el estado del arte respecto a los efectos hidrológicos de los cambios de usos/coberturas del suelo.

En el *Capítulo 5* se detalla la metodología aplicada, incluyendo los fundamentos teóricos del modelo y los procedimientos de SIG y teledetección aplicados para obtener el mapa de suelos y los mapas de usos/coberturas del suelo.

En el *Capítulo 6* se presenta la implementación del modelo a la cuenca en estudio, para los escenarios considerados.

En el *Capítulo 7* se describe la calibración del modelo para dichos escenarios, a partir de eventos precipitación-escorrentía observados.

En el *Capítulo 8* se analizan los cambios de usos/coberturas del suelo entre los escenarios.

En el *Capítulo 9* se evalúan los efectos de dichos cambios sobre la escorrentía directa y los caudales máximos. Para ello, se aplicó el modelo calibrado para cada escenario

considerando como entrada una única tormenta sintética. Se analizan los resultados obtenidos y se relacionan los mismos con los cambios de usos/coberturas y las características de los suelos donde se produjeron dichos cambios. También se relacionan los resultados con la evolución temporal del coeficiente de derrame anual registrado de la cuenca en las últimas décadas.

En el *Capítulo 10* se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta Tesis.

El informe se completa con un listado de referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo general de esta Tesis consiste en investigar los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos).

Los objetivos particulares son los siguientes:

- a) determinar la variación espacio-temporal del coeficiente de escorrentía en la cuenca,
- b) evaluar las variaciones relativas de la escorrentía y del caudal máximo para distintos escenarios de usos/coberturas del suelo.

Los aportes de esta Tesis al ámbito científico son los siguientes:

- a) Se realiza una aplicación inédita del modelo AGWA-KINEROS2 a una cuenca de nuestro país, lo que incluye la adaptación de las tablas de parámetros hidrológicos, de suelos y de usos/coberturas a las condiciones de las cuencas locales.
- b) Se cuantifican los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano, para escenarios de usos/coberturas del suelo registrados en la cuenca y para escenarios hipotéticos futuros.

En cuanto a la transferencia al medio, se aportan herramientas que pueden ser utilizadas para planificar un aprovechamiento sustentable de los recursos de suelo y agua en cuencas de la región.

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA EN ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN

La cuenca del A° Feliciano hasta Paso Medina se ubica en la Provincia de Entre Ríos, entre los 58° 20' y 59° 36' de longitud oeste y los 30° 15' y 31° 6' de latitud sur (Figura N° 3.1).

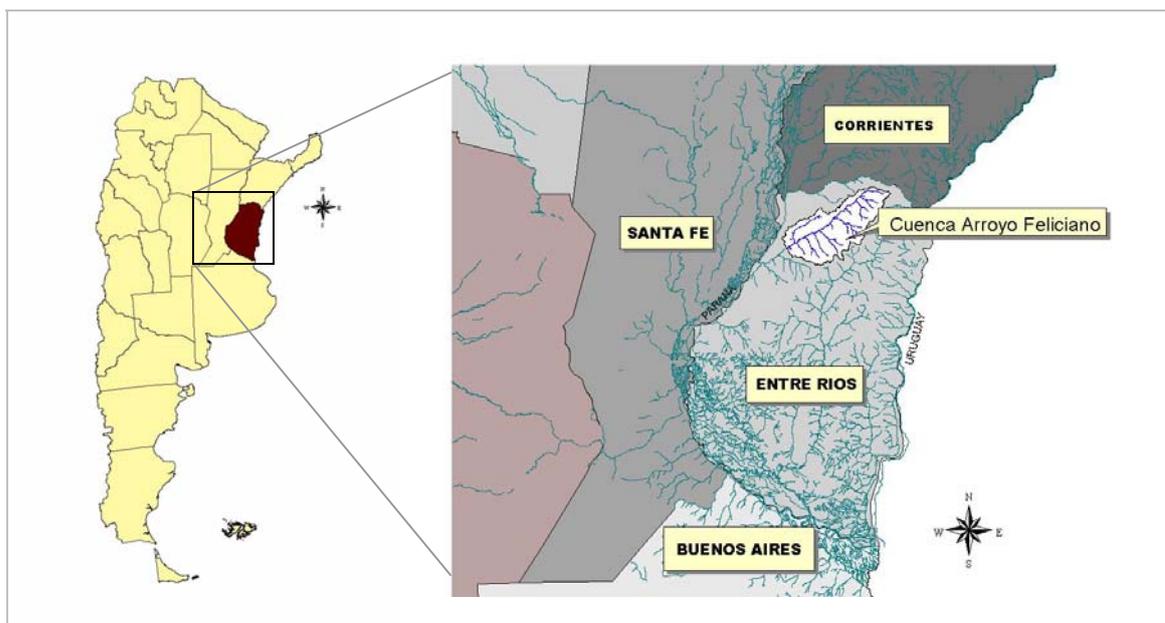


Figura N° 3.1: Ubicación de la cuenca del A° Feliciano.

Su nombre recuerda a Feliciano Rodríguez, acompañante de Juan de Garay en la fundación de Santa Fe y propietario de tierras a orillas de este arroyo. Las costas del tramo inferior estuvieron pobladas por los indios Caletones, del grupo de Chanás y por esta razón, los primeros exploradores españoles llamaron río Caletones a este curso de agua.

La sección de control de la cuenca de estudio se localiza en la intersección del A° Feliciano con la Ruta Prov. N° 6, lugar denominado Paso Medina. En esta sección se ubica una estación limnimétrica y de aforos operada sistemáticamente por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH). La estación se ubica a los 30° 55' 35" de latitud Sur y 59° 33' 00" de longitud Oeste y tiene una altitud de 20,85 m.

La superficie de la cuenca hasta Paso Medina es de 5.541 km² y ocupa parte de los departamentos de La Paz, Federal y Feliciano. Las principales ciudades y localidades ubicadas en la zona se listan en la Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1: Localidades de la zona de estudio

Localidad	Hab (*)
Conscripto Bernardi	1.464
El Cimarrón	674
Federal	16.333
La Esmeralda	541
La Paz	24.716
La Verbena	467
Los Conquistadores	1.214
San Gustavo	1.307
San Jaime de la Frontera	4.037
San José de Feliciano	11.137
Yeso Oeste	681

(*) Hab: habitantes (Censo 2001)

La cuenca está bordeada por la Ruta Prov. N° 1 al Norte, la Ruta Nac. N°127 al Sur y Este y la Ruta Prov. N° 6 al Oeste. Interiormente, las rutas Prov. N° 5, N° 28 y N° 2 atraviesan la cuenca en Paso Birrichín, Paso Bravo y Paso Correa, respectivamente (Figura N° 3.2).

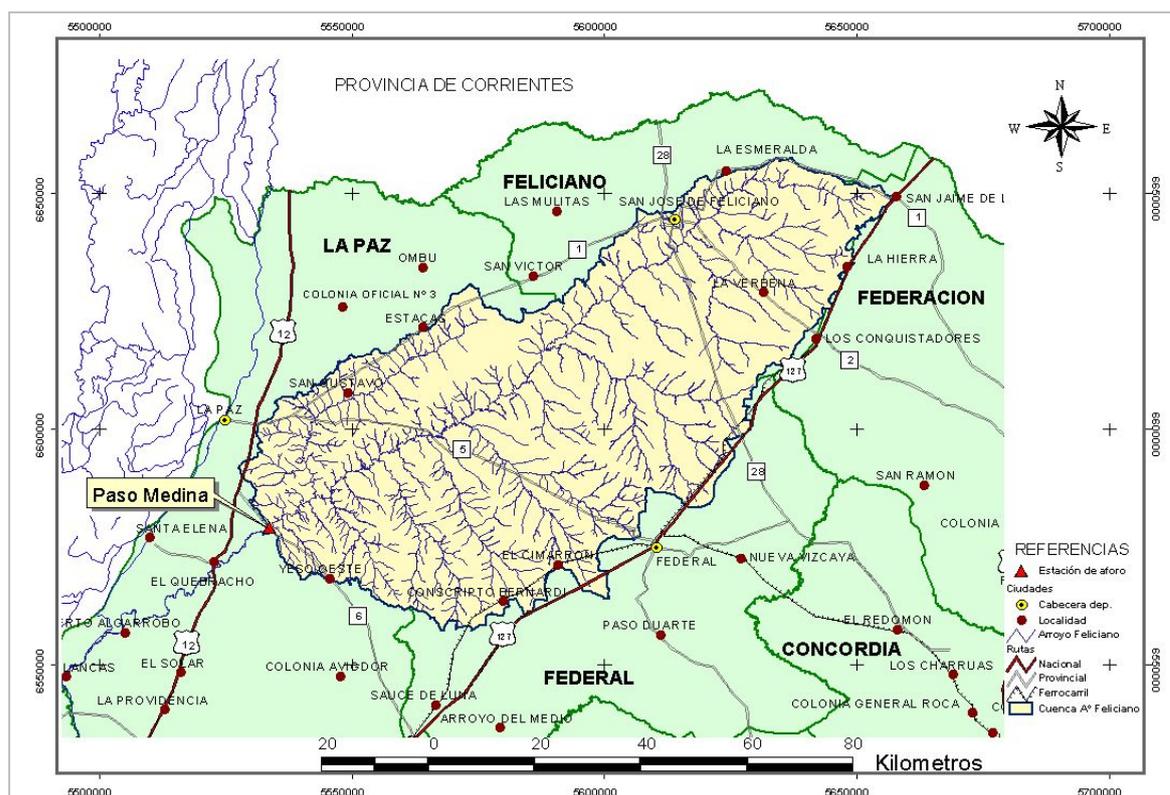


Figura N° 3.2: Ubicación de las principales localidades e infraestructura vial.

3.2. RED HIDROGRÁFICA

El A° Feliciano nace en la loma de Mocoretá y se desarrolla con rumbo Noreste-Suroeste, hasta desembocar en el río Paraná.

3.3. RELIEVE Y FORMA

La cuenca tiene un relieve de llanura suavemente ondulado, con cotas que varían entre los 78.5 m en la cabecera y 18.0 m en la desembocadura, referidas al cero del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Nini (2004) evaluó los siguientes índices morfológicos de la cuenca del A° Feliciano: *Índice de Compacidad* $K_c = 1,38$ lo que indica que tiene una forma óvalo-redonda a óvalo-oblonga, “en forma de hoja”.

Relación de Circularidad $C = 0,53$

Relación de Elongación $E = 0,77$ lo que indica un área de relieve acentuado.

La Figura N° 3.4 muestra la curva hipsométrica de la cuenca en estudio.

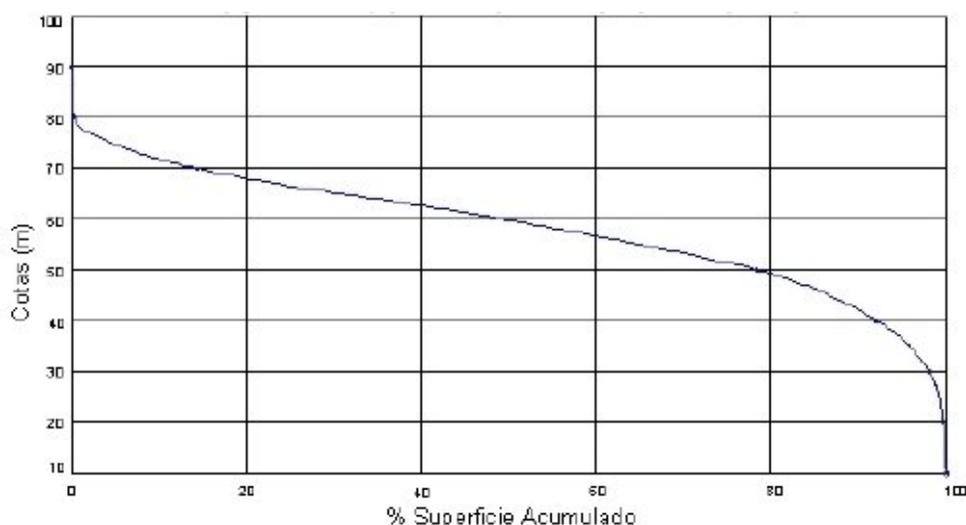


Figura N° 3.4: Curva hipsométrica de la cuenca en estudio (fuente: Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos).

3.4. CLIMA

El clima en Entre Ríos presenta una transición entre los climas subtropical y templado y se caracteriza por tener abundantes precipitaciones durante todo el año.

En el extremo septentrional, presenta un clima subtropical sin estación seca, siguiendo hacia el sur un clima templado, que abarca la mayor parte de la Provincia.

La Tabla N° 3.3 muestra los valores medios mensuales y anuales de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa correspondientes a la estación Concordia Aero para el período 1981-1990 (fuente: Servicio Meteorológico Nacional, SMN).

Tabla N° 3.3: Valores medios de precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa en la estación Concordia Aero (1981-1990).

MES	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Viento (km/h)	Humedad (%)
Set	90,3	15,3	12,6	73
Oct	109,0	19,0	12,0	69
Nov	152,0	21,9	11,6	69
Dic	79,7	24,4	10,8	63
Ene	117,7	26,3	10,3	62
Feb	161,2	24,8	9,6	70
Mar	157,1	22,7	8,7	71
Abr	150,8	18,8	8,2	78
May	109,8	15,4	8,2	79
Jun	53,2	12,2	7,7	81
Jul	53,5	12,3	10,2	79
Ago	73,7	14,1	10,9	76
Anual	1307,8	18,9	10,1	73

3.5. PLUVIOMETRÍA

Para este estudio se dispuso de la información diaria de 23 estaciones pluviométricas operadas por la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos (DPHER) para el período de registro común 1980 – 2007. El listado de las estaciones se muestra en la Tabla N° 3.4 y la ubicación de las mismas, en la Figura N° 3.5.

Tabla N° 3.4: Estaciones pluviométricas consideradas en este estudio

N°	Estación			Coordenadas Gauss-Krüger	
	Código	Nombre	Departamento	X (m)	Y (m)
1	1	Feliciano	Feliciano	5620102	6638518
2	102	Banderas	Federal	5573272	6590365
3	103	El Solar	La Paz	5526760	6555754
4	104	Colonia Avigdor	La Paz	5556493	6550556
5	107	Buena Esperanza	Federación	5652705	6621949
6	108	El Cimarrón	Federal	5601093	6572063
7	109	El Carmen	La Paz	5559320	6586679
8	110	El Quebracho	La Paz	5531803	6572832
9	111	Estacas	La Paz	5571194	6616965
10	112	La Lila	La Paz	5547360	6559132
11	113	La Esmeralda	Feliciano	5628485	6647801
12	114	La Verbena	Feliciano	5637046	6624483
13	115	La Calandria	Federal	5627807	6589733
14	121	San Gustavo	La Paz	5559016	6605775
15	125	Com. Yeso Oeste	La Paz	5554280	6569104
16	402	Conscripto Bernardi	Federal	5587453	6564908
17	407	Federal	Federal	5616603	6575357
18	414	Los Conquistadores	Federación	5648612	6614143
19	421	Sauce de Luna	Federal	5574450	6544118
20	603	San Víctor	Feliciano	5593490	6627373
21	705	San Jaime	Federación	5663412	6641656
22	803	Colonia Oficial N°3	La Paz	5556185	6620114
23	809	La Paz	La Paz	5535053	6598480

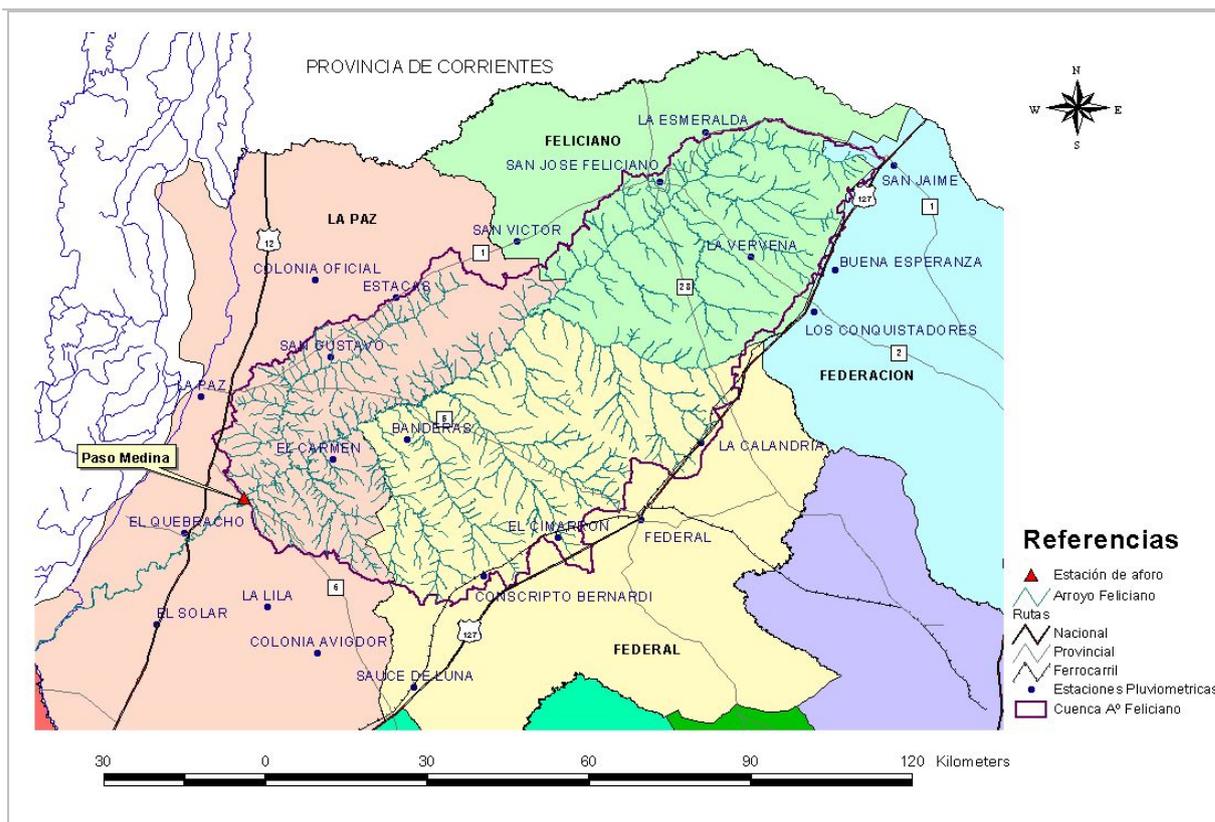


Figura N° 3.5: Ubicación de las estaciones pluviométricas

La precipitación areal media anual en la cuenca para el período 1980/81-1996/97 es de 1.252 mm. El procesamiento realizado a la información pluviométrica se describe en el Anexo I.

3.6. HIDROMETRÍA

Para esta Tesis se dispuso del registro de caudales medios diarios del A° Feliciano en Paso Medina, correspondiente al período 1975/76-2006/07 (fuente: SSRH). En la Tabla N° 3.5 se muestran los caudales mensuales y anuales para el período mencionado.

Para este estudio se adoptó el inicio del año hidrológico en el mes de septiembre, de manera similar al adoptado por la SSRH.

Tabla N° 3.5: Caudales mensuales y anuales del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH)

Estadístico	Caudal (m ³ /s)												
	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Año
Medio	26,4	38,2	55,1	49,1	44,4	50,4	72,3	126,3	77,8	54,1	26,9	14,8	51,5
Máximo	169	316,1	299,8	272,6	348,3	275,6	438,2	459,7	278,9	372,7	134,7	60,2	134,5
Mínimo	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,4	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	5,0

Como se puede observar, los caudales medios mensuales más elevados ocurren en el mes de abril y los menores, en agosto.

Los escurrimientos anuales, caudales específicos anuales y caudales diarios máximos y mínimos para el mismo período se presentan en la Tabla N° 3.6.

Tabla N° 3.6: Escurrimientos anuales, caudales específicos anuales y caudales diarios máximos y mínimos del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH)

Estadístico	E (hm ³)	E (mm)	q (lt/s/km ²)	Q diario máximo (m ³ /s)	Q diario mínimo (m ³ /s)
Medio	1.626,0	292,4	9,3	780,0	0,8
Máximo	4.242,0	762,7	24,2	2.180,0	2,5
Mínimo	156,2	28,1	0,9	108,1	0,0

E: escurrimiento anual, q: caudal específico anual, Q: caudal.

La Figura N° 3.6 muestra la variación temporal de los caudales medios diarios para el período mencionado, con indicación de las fechas de ocurrencia de los caudales máximos de las principales crecidas.

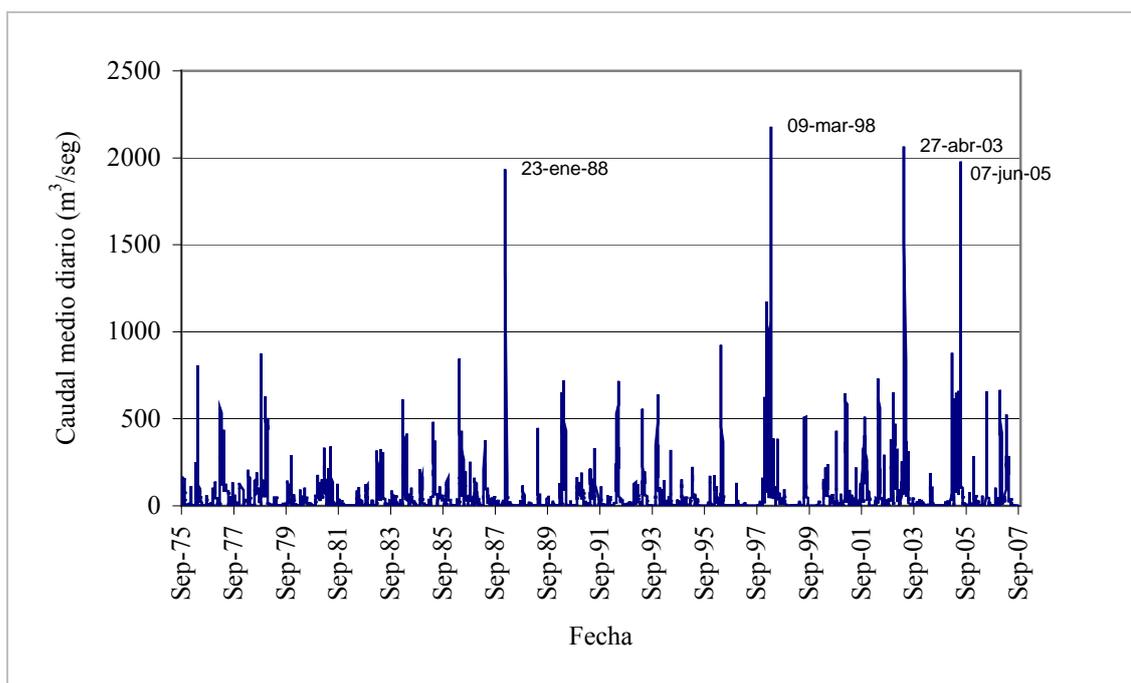


Figura N° 3.6: Caudales medios diarios del A° Feliciano en Paso Medina (1975/76-2006/07) (Fuente SSRH).

3.7. SUELOS

Para esta Tesis se dispuso del “Atlas de Suelos de la República Argentina” en formato digital, elaborado por Aeroterra S.A., el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Fundación ArgenINTA (Aeroterra et al., 1995). A partir de dicho mapa nacional

se obtuvo el correspondiente a la cuenca en estudio (Figura N° 3.7). La Tabla N° 3.7 muestra los Órdenes, Subórdenes, Grupos y Subgrupos de suelos y las superficies ocupadas por los mismos en la cuenca en estudio.

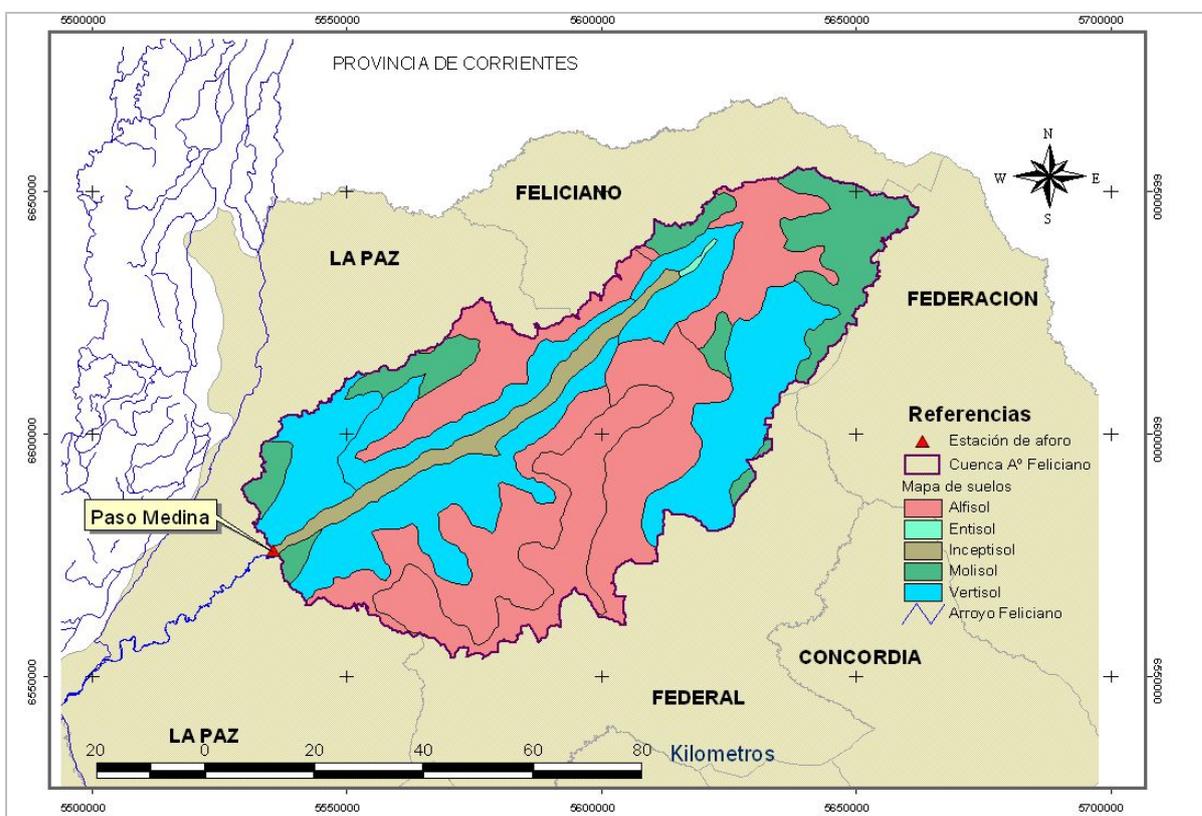


Figura N° 3.7: Mapa de suelos de la cuenca en estudio (Fuente Atlas de Suelos de la República Argentina – INTA)

Tabla 3.7: Clases de suelos en la cuenca del A° Feliciano (Fuente Atlas de Suelos de la República Argentina – INTA)

Simbc	Orden	Suborden	Grupos	Sub Grupo	Area (has)	Porcentaje Grupo	Porcentaje Orden
AFtc-2	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Tipico	92980,387	16,78%	45,5%
AFve-1	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Vertico	58566,632	10,57%	
AFve-3	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Vertico	100815,610	18,19%	
ECtc-2	Entisol	Acuent	Haplacuent	Tipico	922,220	0,17%	0,2%
ICtc-1	Inceptisol	Acuept	Halacuept	Tipico	26247,495	4,74%	4,7%
MCve-1	Molisol	Acuol	Argiacuol	Vertico	54003,019	9,75%	13,7%
MIac-12	Molisol	Udol	Argiudol	Acuico	6658,737	1,20%	
MIve-7	Molisol	Udol	Argiudol	Vertico	12295,405	2,22%	
MJfv-2	Molisol	Udol	Hapludol	Fluventico	3199,048	0,58%	
VBag-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argico	30647,428	5,53%	35,8%
VBay-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argiacuolico	21620,298	3,90%	
VBay-2	Vertisol	Udert	Peludert	Argiacuolico	57277,637	10,34%	
VBaz-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argiudolico	88892,846	16,04%	

Se observa que los vertisoles y molisoles ocupan el 49,5 % de la superficie de la cuenca y se ubican preferentemente próximos a la red de drenaje.

3.8. VEGETACIÓN

La cuenca en estudio se ubica dentro de la región forestal del Espinal. En esta región se diferencian 3 distritos florísticos: del Ñandubay, que ocupa la totalidad de la cuenca en estudio, del Espinal (o del Algarrobo) y del Caldén. La Figura N° 3.8 muestra la ubicación de esta región y sus distritos (fuente: Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas (PBNyAP), Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) y Dirección de Bosques de la Nación (DB), 2007).

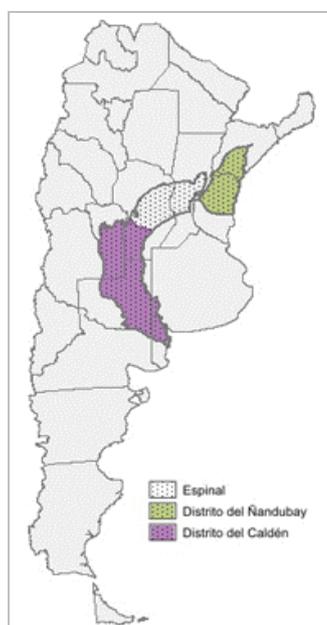


Figura N° 3.8: Ubicación de la región del Espinal y sus distritos Espinal, Ñandubay y Caldén. (Fuente: PBNyAP, SAyDS y DB, 2007).

La región se caracteriza por la dominancia de especies arbóreas. Presenta un bosque xerófilo, similar al de la Provincia del Chaco pero más bajo, sin el quebracho colorado, con diversas especies del género *Prosopis* (Ñandubay) y *Acacia*. Además, hay palmares, sabanas gramíneas, estepas y otras.

En algunos sectores de la Provincia de Entre Ríos, el distrito del Ñandubay es conocido como la "Selva de Montiel" y presenta un reconocido valor como área de biodiversidad. Antiguamente, la Selva de Montiel ocupaba aproximadamente un tercio de la Provincia de Entre Ríos, pero en la actualidad se remite solo a manchones ubicados en el centro-norte y centro-oeste de la misma, más precisamente en los departamentos Federal, San José de Feliciano y Villaguay.

Si bien no es una selva como la Paranaense o la de Yungas, su aspecto enmarañado de bosque espinoso, hizo que se instaurara en el lenguaje popular la denominación selva, tal vez acaso por su fama de lugar impenetrable.

El 92 % de la vegetación existente corresponde a plantas nativas. Las dos especies arbóreas que predominan son el **ñandubay** (*Prosopis affinis*), el **algarrobo negro** (*Prosopis nigra*) (declarado en peligro de extinción en 1996) y el **algarrobo blanco** (*Prosopis alba*). A éstos los acompañan árboles de mediano porte de origen chaqueño como **espinillos** (*Acacia caven*), molles, talas, chañares, coronillos u ñapindaes, que de vez en cuando se encuentran escoltados por un verdadero gigante, el quebracho blanco. El espinillo se comporta como pionero y dominante en el renoval después del desmonte (Casermeiro et al., 2001).

Es además característica la presencia de dos especies de palmeras: la palma real o **yatay** que se destaca en el paisaje con su esbelta figura y la **caranday** (*Trithrinax campestris*) o carandilla, mucho más pequeña y cuyas hojas poseen afiladas puntas.

A estos componentes se le suma la vegetación de las selvas en galería que se desarrollan en las márgenes de los ríos y arroyos.

El paisaje se completa con un denso sotobosque de gramíneas, que cada tanto aparece salpicado de tunas, cardones y pajonales inundables.

En el año 1995 se creó un sistema de áreas protegidas en la Provincia de Entre Ríos, a través de la Ley Provincial N° 8.961, que abarca una superficie de 56.700 ha e incluye áreas de jurisdicción nacional, provincial, municipal y privada.

La mayor Reserva de Usos Múltiples Provincial es la llamada Selva de Montiel. Se ubica en la cuenca del A° Feliciano y comprende una superficie de 70.000 has. Se trata de terrenos privados ubicados en la estancia “El Rincón”, cerca del paraje “El Gato”, a 45 km de la ciudad de Federal. A pesar de su condición de reserva, en abril del 2008 las autoridades provinciales verificaron la realización de un desmonte de 50 has sin autorización.

En el Anexo II se describe en mayor detalle la Región del Espinal y en el Anexo III se presenta un mapa con la ubicación de las áreas protegidas.

3.9. CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

Procesos de deforestación

La región *del Espinal* es una de las regiones forestales en estado de conservación más crítico de la Argentina. La superficie forestal se ha reducido en forma significativa, debido a que una parte de la región ha sido transformada a los usos agrícolas y de pastoreo.

A lo largo de su existencia, el hombre ha utilizado los productos del bosque para diversos usos, produciendo su eliminación parcial o total.

La vegetación original se ha reducido en superficie y estructura, siendo transformada profundamente con relación a los bosques naturales anteriores al proceso de colonización, explotación de recursos forestales y expansión agropecuaria, actividad que se intensificó en los últimos 20 años.

Desde hace algunos años, como consecuencia del avance de la agricultura, se vienen registrando desmontes y talas indiscriminadas del bosque nativo en la Provincia de Entre Ríos.

En el año 2003, el gobierno Provincial declaró la emergencia ambiental y ordenó detener la tala de los montes naturales y selvas ribereñas, tanto públicas como privadas, medida que rige en todo el ámbito de la Provincia, pero de difícil control por parte de las autoridades.

Un informe del año 2006 de la SAyDS expresa: *“El avance de la frontera agrícola de las últimas décadas se ve favorecida por la mayor rentabilidad de los productos agrarios, el aparente aumento de las precipitaciones y la utilización de modernas técnicas agropecuarias (sistemas de riego, siembra directa, uso de agroquímicos, etc.), que permiten el uso de áreas que en el pasado no eran deseables para cultivos, provocando el desplazamiento de la ganadería hacia zonas marginales, especialmente los bosques nativos remanentes”*.

En el “Informe Regional Espinal-Segunda Etapa - Estado de Conservación del Distrito Ñandubay” elaborado por la SAyDS (2006), se expresa lo siguiente:

“El proceso de retracción y degradación del ñandubaysal responde a una compleja trama de causales ecológicas, económicas, sociales, político-institucionales y tecnológicas. Gran parte de los recursos forestales de la región han sido diezmados por actividades humanas, muchas veces sinérgicas, entre las principales causas se destacan: a) sobre-explotación selectiva de maderas duras (floreo); b) desmonte y tala rasa para la reconversión a tierras agrícolas; c) larga historia de ganadería extensiva con capacidades de carga elevadas; d) generalización de la práctica de fuego como herramienta de manejo ganadero y de los pastizales; e) reemplazo por plantaciones de especies arbóreas de rápido crecimiento, algunas con un potencial de invasibilidad alto; f) construcción de represas y otras obras de ingeniería; g) uso indebido de agroquímicos para combatir especies perjudiciales; h) deficiencias en las políticas de gestión y contralor por parte del Estado. Otros problemas se relacionan con la caza furtiva y la introducción de animales exóticos, que contribuyen a la pérdida de biodiversidad animal y vegetal.”

En el año 2007 se sancionó la Ley Nacional N° 26.331 de presupuestos mínimos para los Bosques Nativos, estando pendiente su reglamentación por parte del Poder Ejecutivo Nacional. Para esto, las autoridades de Entre Ríos están realizando el ordenamiento territorial de los mismos, con la colaboración del INTA y la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Si bien esta ley establece la prohibición de desmontes hasta tanto cada Provincia realice su ordenamiento territorial, en Entre Ríos se siguen registrando desmontes clandestinos.

El Informe Regional Espinal – Segunda Etapa de la SAyDS (2007) presenta una tabla con los valores de superficie ocupadas por las distintas clases de cobertura, de acuerdo a la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), correspondiente a los sectores de las dos Provincias que ocupan el distrito Ñandubay, Entre Ríos y Corrientes. A partir de dicha tabla se confeccionó la Tabla N° 3.8, donde se presentan los valores de superficie correspondientes a Entre Ríos.

Tabla N° 3.8: Superficies por clase de cobertura del Distrito Ñandubay en Entre Ríos (Fuente: PBNyAP, SAyDS, DB Informe Regional Espinal-Segunda Etapa-2007)

Clase de Cobertura	Nivel 1	Nivel 2	Superficie (has)	Superficie (%)
Tierras forestales	Bosque de Ñandubay	Ñandubay y Espinillo	575.753	13,5
		Ñandubay y Espinillo con otras especies	615.639	14,5
	Bosque de transición		421	0,01
SUBTOTAL TIERRAS FORESTALES			1.191.813	28,01
Otras tierras forestales	Ñandubay Tipo Parque		212.736	5,00
	Arbustales		7.757	0,2
	Bosque en Galería		208.943	4,9
	Palmares		8.355	0,2
SUBTOTAL OTRAS TIERRAS FORESTALES			437.791	10,3
Otras Tierras	Pastizales		181.622	4,3
	Cultivos		2.011.009	47,3
	Vegetación herbácea hidrófila		160.200	3,8
	Tierras con construcciones		21.563	0,5
	Plantaciones forestales		201.073	4,7
	Cuerpo de agua		48.525	1,2
	Sin vegetación		1.853	0,04
SUBTOTAL OTRAS TIERRAS			2.625.845	61,7
TOTAL			4.255.449	100,00

Se puede observar que, en el Distrito Ñandubay, la cobertura de “Cultivos” (47,3 %) es más extensa que la cobertura forestal (38,3 %).

De acuerdo a los resultados obtenidos, las clases del Bosque de Ñandubay y Ñandubay Tipo Parque son las clases de vegetación natural con mayor número de fragmentos, lo que **indica procesos intensos de fragmentación del bosque**. El fragmento de mayor tamaño de Bosque de Ñandubay se encuentra en Entre Ríos y más precisamente en la cuenca del A° Feliciano.

Expansión de la actividad agrícola

La Provincia de Entre Ríos, se caracteriza por su actividad agropecuaria, destacándose el cultivo de cuatro cereales: trigo, maíz, arroz y sorgo y tres oleaginosas: lino, girasol y soja.

En los últimos 20 años la superficie sembrada total se incrementó notablemente, crecimiento que se acentuó a partir de mediados de los '90, cuando comenzó a aumentar el cultivo de la soja. En el período comprendido entre el año 1991/92 al 2006/07, la superficie sembrada de soja se triplicó, pasando de 630.000 has a 1.966.050 has, según la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos de la Nación (SAGPyA). La Figura N° 3.9 muestra la evolución de la superficie sembrada total en los últimos años.

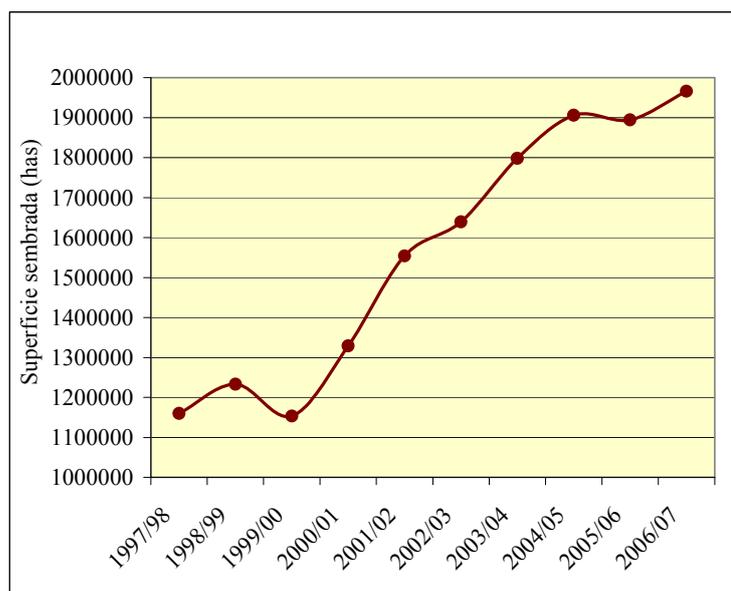


Figura N° 3.9: Evolución de la superficie total sembrada en Entre Ríos (período 1997/2006)
(Fuente: SAGPyA)

La Figura N° 3.10 muestra la evolución de la superficie sembrada por cultivo. Mientras que el área sembrada con sorgo, maíz y girasol sufrió una gradual disminución, de 384.700 has en 1997/98 (33 % del total sembrado) a 302.410 has en 2006/07 (15 %), el área sembrada con soja aumentó significativamente en el mismo período, de 272.000 has (23 %

del total) a 1.285.000 has (65 %), con un crecimiento de más de 1.000.000 de has en 10 años. La Figura N° 3.11 muestra la evolución temporal de la superficie sembrada con soja.

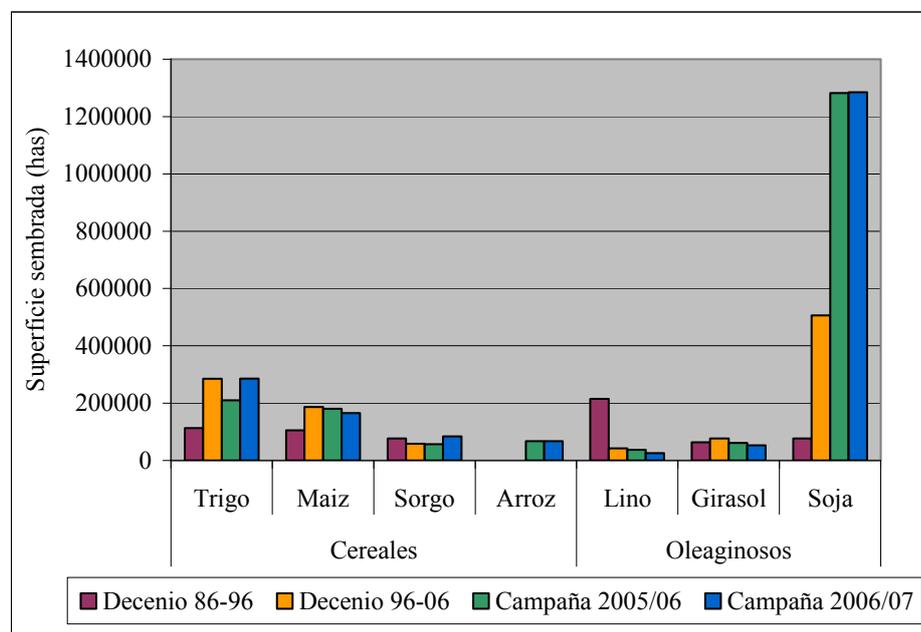


Figura N° 3.10: Evolución de la superficie sembrada en Entre Ríos por cultivo (período 1986/2006) (Fuente: Bolsa de Cereales de Entre Ríos. Proyecto Siber)

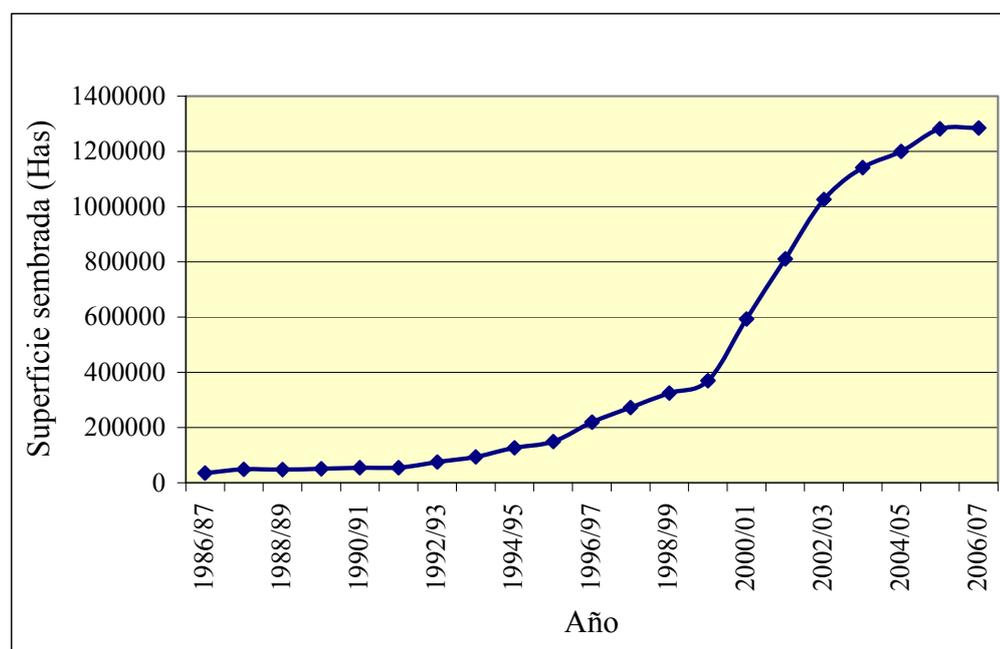


Figura N° 3.11: Evolución de la superficie sembrada de soja en Entre Ríos 1986-2006

La Figura N° 3.12 muestra la distribución areal de la superficie sembrada con soja en la Provincia de Entre Ríos durante la campaña 2006/07.

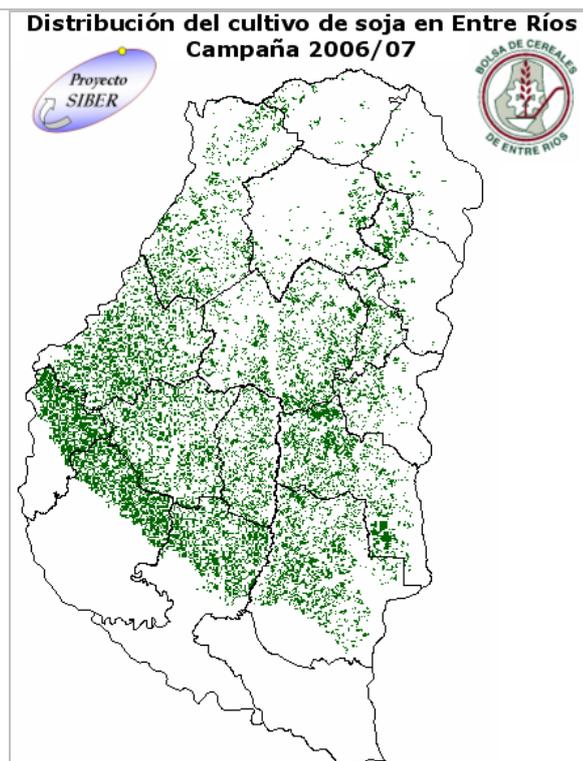


Figura N° 3.12: Superficie destinada al cultivo de soja durante la campaña 2006/07

Se observa que la mayor concentración se encuentra en la zona Sur y Centro de la Provincia, disminuyendo hacia el Norte.

La incorporación de nuevas áreas a la agricultura se hizo avanzando sobre montes y bosques nativos, antes dedicados a la cría de ganado, produciéndose cambios en el uso y cobertura del suelo. Esto se ha producido mayormente en la zona Centro y Sur de la Provincia, pero también se puede observar el avance en el Norte y Noroeste.

Por otra parte, en relación con las prácticas agrícolas, Tasi et al. (2003) expresan que *“predomina la secuencia de diferentes cultivos y no rotaciones con pasturas, donde el cultivo de soja participa en una elevada proporción, mostrándose como antecesor casi único de los demás cultivos”*.

Los cambios de uso y cobertura del suelo afectan no sólo a animales y seres humanos, que son desplazados de sus territorios, sino también a los suelos. Los efectos de dichos cambios sobre la estructura y los parámetros hidráulicos de los suelos son particularmente importantes cuando éstos tienen altos contenidos de arcillas expandibles y un drenaje interno impedido, como es el caso de los Vertisoles y Molisoles presentes en la cuenca en estudio. Dichos efectos han sido evaluados en investigaciones recientes, tal como se describe en el Capítulo 4.

CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE

Existen numerosas publicaciones en la literatura que tratan los efectos hidrológicos de los cambios de usos/coberturas del suelo.

Algunos autores orientaron sus investigaciones a la evaluación de los cambios en la cantidad y distribución de la escorrentía superficial por medio de la modelación matemática.

Matheussen et al. (2000) evaluaron los efectos hidrológicos de cambios de vegetación en la cuenca del río Columbia (EUA) a lo largo del último siglo, usando 2 escenarios de cobertura. El primero fue una reconstrucción de la cobertura vegetal histórica (año 1900), estimada por el Columbia Basin Ecosystem Management Project (ICBEMP). El segundo fue la cobertura actual, estimada a partir de datos de sensores remotos para 1990. Se aplicó un modelo hidrológico con una resolución de grilla de aproximadamente 500 km² por celda. Los resultados muestran que el cambio más importante relacionado con la vegetación ha sido una tendencia general hacia una disminución de la madurez de la vegetación en las áreas forestadas de la cuenca. En las subcuencas con mayores cambios, la escorrentía aumentó entre el 4,2 y 10,7 % y la evapotranspiración disminuyó entre un 3,1 y 12,1 %.

Niehoffa et al. (2002) evaluaron los impactos de cambios de uso de suelo sobre la escorrentía basado en una simulación compuesta de 3 partes: (1) generación de escenarios de uso de suelo explícitos espacialmente, (2) modelación de la generación de escurrimiento basada físicamente y espacialmente distribuida (modelo WaSiM-ETH), (3) aplicación de este procedimiento y demostración de resultados para una cuenca de meso escala predominantemente agrícola en un paisaje de suelos francos en el Sudoeste de Alemania. Con el objeto de extender las facilidades del modelo para representar adecuadamente los mecanismos de generación de escorrentía originados por el uso del suelo, se introdujeron al modelo las siguientes facilidades adicionales: a) un módulo de macroporos para explicar los procesos de infiltración rápida, b) un módulo de sedimentación para **decrecimiento de la conductividad hidráulica** de la superficie de tierra, como una función de la intensidad de lluvia y de la cobertura de la vegetación, c) una variabilidad interna de cada celda de la grilla, considerando la porción impermeable y sellada de la celda. Los resultados muestran que la influencia de las condiciones de uso de suelo sobre la generación de escurrimiento depende fundamentalmente de las características de la lluvia y de la escala espacial relacionada, por ej. la influencia es sólo relevante para tormentas convectivas con altas intensidades de lluvia en contraste con lluvias advectivas de largas duraciones y bajas intensidades.

Croke et al. (2004) aplicaron el modelo de transformación precipitación-escorrentía IHACRES para predecir la respuesta hidrológica a cambios de uso de suelo y pronosticar caudales en cuencas no aforadas en regiones ubicadas al Noreste de Tailandia, donde los impactos de la deforestación son muy importantes.

Brown et al. (2007) aplicaron en forma acoplada un modelo de cambio de uso de suelo con el Modelo Integrado de Cantidad y Calidad (IQQM) en la cuenca del río Murrumbidgee, en el Sudeste de Australia. Acoplando los dos modelos pudieron evaluar el impacto hidrológico de potenciales expansiones de cultivos para varias secciones a través del sistema del río.

Kepner et al. (2008) presentaron 2 estudios en los cuales se examinaron escenarios de uso de suelo futuros y se evaluaron sus impactos sobre las condiciones de agua superficial (carga de sedimento y escurrimiento superficial), usando modelos hidrológicos asociados con la herramienta AGWA. Para ambos estudios se modificó la grilla de cobertura de suelo para reflejar las condiciones de los años '20 a '60 y escenarios futuros seleccionados. Un tercer estudio utilizó datos históricos de cobertura de suelo para validar la aproximación y explorar la incertidumbre asociada con los escenarios de análisis.

Chuanguo et al. (2009) evaluaron las respuestas hidrológicas inducidas por cambios de uso de suelo, que han afectado una amplia porción de China en el último siglo. Los efectos fueron evaluados por medio de un modelo acoplado hidrológico-cobertura. Los principales cambios de uso del suelo fueron evaluados por el Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) para la cuenca del río Huaihe. Las variaciones de caudales máximos debidas a las deforestaciones extensivas fueron investigadas por simulación de los procesos hidrológicos a una escala de grilla de 10 km, para 2 escenarios de uso de suelo y para los mismos datos meteorológicos, condiciones iniciales y otros parámetros del modelo. Los resultados indican que es notable la sensibilidad de la evapotranspiración, humedad del suelo y escurrimiento superficial a los cambios de uso del suelo y demuestran que la deforestación actual agrava los riesgos de inundación.

Otros investigadores han evaluado las modificaciones en el escurrimiento y la erosión originadas por cambios en la cobertura vegetal, en base a ensayos experimentales con parcelas de escurrimiento.

Hibbert (1967) resumió y analizó 39 estudios de deforestación en bosques tropicales del mundo. Encontró que el límite superior del aumento de la producción de escorrentía fue de 4,5 mm/año por cada 1% de reducción de la cobertura de bosque. A partir de los resultados formuló las siguientes generalizaciones: (1) La reducción de la cobertura de

bosques aumenta la producción de agua. (2) El establecimiento de cobertura de bosque sobre suelo escasamente vegetado disminuye la producción de agua. (3) La respuesta al tratamiento es altamente variable y para la mayoría de los casos, impredecible.

Bosch y Hewlett (1982) evaluaron los efectos del cambio de vegetación sobre la producción de agua por medio del análisis y revisión de los resultados obtenidos en 94 cuencas experimentales a través del mundo. Los resultados de la revisión de Hibbert (1967) de estudios en 39 cuencas fueron poco modificados por la adición de los resultados de 55 investigaciones más recientes. La evidencia adicional apoyó fuertemente sus 2 primeras generalizaciones pero no así la tercera. Los autores encontraron que el tipo de vegetación tiene una influencia sobre la producción de escurrimiento de la siguiente manera: i. Bosques de coníferas producen un cambio de 40 mm/año en la producción de escurrimiento cada 10 % de cambio de cobertura de bosque. ii. Bosques de madera dura caduca producen un cambio de 25 mm/año en la producción de escurrimiento cada 10 % de cambio de cobertura. iii. Arbustos y pradera producen un cambio de 25 mm/año en la producción de escurrimiento cada 10 % de cambio de cobertura.

Abrahams et al. (1995) evaluaron los efectos del cambio de vegetación sobre el escurrimiento y la erosión por medio de experimentos de campo sobre parcelas de escurrimiento pequeñas y grandes ubicadas contemporáneamente en colinas cubiertas de pradera y con arbustos sin praderas, en la cuenca experimental Walnut Gulch (Arizona, EUA). Los experimentos indican que el reemplazo de la pradera causa un aumento del escurrimiento y de la erosión, una disminución de la resistencia del flujo superficial y de la infiltración y un aumento de la heterogeneidad espacial de la cobertura vegetal. El aumento de escurrimiento y erosión resulta en una remoción de la estructura superficial del horizonte A, la formación de costras en los espacios entre arbustos y el desarrollo de pequeñas cárcavas.

Kosmas et al. (1997) evaluaron el efecto del uso del suelo y precipitación sobre la escurrimiento anual y la pérdida de sedimento en 8 sitios diferentes a lo largo de la región Mediterránea nordeste y la línea costera Atlántica ubicada en Portugal, España, Francia, Italia y Grecia. Esos sitios representan una variedad de paisajes y están bajo una cantidad de usos de suelo representativos de la región Mediterránea, tales como suelos agrícolas con cereales de secano, vinos, olivos, plantación de eucaliptos y vegetación natural. Encontraron que el uso del suelo puede afectar mucho la escurrimiento y la erosión del suelo.

Andreassian (2004) realizó una revisión histórica de la literatura científica referida al impacto de los bosques en los caudales y concluyó que la tala de árboles genera en una

primera etapa un incremento en la producción de agua, siguiendo luego una segunda etapa de disminución, atribuida al crecimiento del nuevo bosque.

Iroumé et al. (2006) evaluaron los efectos hidrológicos de una tala rasa de una plantación de *Pinus radiata*, que cubría el 79.4 % de la cuenca experimental La Reina, en el Sudeste de Chile. A partir del análisis de las mediciones de caudales antes y después de la tala, concluyeron que en situación posttala rasa, la escorrentía anual aumentó el 110 % y los caudales máximos aumentaron un 32 % en promedio.

Fiener y Auerswald (2006, b) evaluaron la pérdida de suelo originada por 2 tipos de cultivos (papa y maíz) y distintas prácticas en 4 cuencas experimentales ubicadas en las colinas Tertiary (Alemania). Para ello, utilizaron datos de 198 eventos precipitación-escorrentía durante el período de observación (1994-2001).

Fiener y Auerswald (2006, a) evaluaron medidas compensatorias para mitigar los efectos de aumento de la escorrentía y de los procesos de erosión en suelos agrícolas. Propusieron incorporar canales empastados donde se concentra la escorrentía de suelos arables. Los Grassed Waterways (GWWs) provén una distancia de traslado del agua de algunos cientos de metros, sobre una superficie llana e hidráulicamente rugosa. Por medio de una modelación matemática evaluaron la eficiencia de los GWW para cuencas mayores a 1000 has y para distintos tipos de cobertura y distintas tormentas de diseño. En base a los resultados obtenidos, concluyeron que los GWW permitieron reducir los caudales máximos y la escorrentía, variando las eficiencias según los escenarios.

Fullen (2007) investigó las tasas de escorrentía y erosión sobre suelos arenos limosos en la estación experimental Hilton (Shropshire, Inglaterra). Escasa escorrentía y erosión ocurrió sobre parcelas de escurrimiento insertadas en praderas permanentes empinadas. La mayor parte de la precipitación infiltró dentro del suelo y fue transmitida pendiente abajo como flujo subsuperficial dentro del horizonte A. Por el contrario, una considerable cantidad de escorrentía y erosión ocurrió en parcelas sobre suelo arable desnudo.

En el libro “Hydrologic Effects of a Changing Forest Landscape”, escrito por el Committee on Hydrologic Impacts of Forest Management del National Research Council de EUA (2008), se establecen principios generales de la respuesta hidrológica a la remoción parcial o completa de la cobertura de los bosques. Entre los más importantes pueden mencionarse los siguientes: a) disminuye la interceptación y aumenta la precipitación efectiva que llega a la superficie del suelo, b) disminuye la transpiración, c) las disminuciones en interceptación y transpiración aumentan la humedad del suelo, la disponibilidad de agua para las plantas y la producción de agua, d) se modifican las fases de flujo de agua, aumenta el

flujo superficial hacia los canales y e) aumentan los procesos de erosión. Estos principios describen el estado del conocimiento, basado en estudios de cuenca y mediciones realizadas principalmente en la segunda mitad del siglo XX.

En nuestro país, Michelena et al. (1989), analizaron los cambios de las principales propiedades físicas y químicas de los suelos del Norte de la región Pampeana, sometidos a cultivos intensivos desde inicios de la década del 70'. Para ello, evaluaron y compararon propiedades físicas e hidráulicas de los suelos entre lotes bajo cultivo y suelos "vírgenes" (ej. cascos de establecimientos). En base a los resultados obtenidos concluyeron que *"la disminución del índice de estructura y de la percolación de los suelos sometidos a cultivos intensivos es alta, del orden del 50 % en ambos casos, mientras que el horizonte A disminuyó aproximadamente 5cm en promedio por efecto de la erosión hídrica ("lavado de suelos")"*.

Cerana et al. (2005) evaluaron las propiedades físicas de los suelos **Vertisoles** de Entre Ríos. Las características físicas de éstos están dominadas por amplios procesos de hinchamiento y contracción. Entre sus características muy particulares, los Vertisoles muestran una alternancia de sus estados estructurales, modificando la relación de poros, debido a razones climáticas (ej. precipitaciones) o antrópicas. La porosidad estructural comprende grietas de contracción y bioporos; solo en los horizontes más superficiales aparece un volumen de bioporos más o menos estable. La estabilidad estructural de un suelo se refiere a la capacidad del mismo para mantener la arquitectura de la fase sólida y la organización del espacio poroso cuando es expuesto a diferentes tipos de estrés. Los autores concluyeron que estos suelos presentan alta estabilidad estructural en condiciones naturales pero que **son afectados severamente por el uso agrícola**, que provoca **pérdida de materia orgánica y erosión**, y tienden a magnificar los síntomas de deterioro cuando son puestos en producción. Son **susceptibles a la compactación**, en particular cuando las operaciones de campo son realizadas con altos contenidos hídricos. La compactación inducida o el **encostramiento** se acentúan con los requerimientos de una producción cada vez más intensiva y resultan muchas veces irreversibles. La **destrucción de la estructura** origina una **disminución de la conductividad hidráulica**.

Kinderknecht et al. (2004) investigaron los procesos de escurrimiento y erosión sobre suelos **Molisoles** y **Vertisoles** sometidos a uso agrícola, mediante el uso de simuladores de lluvia sobre parcelas de escurrimiento de 25 m² ubicadas en el campo experimental del INTA en Paraná. Antes de realizar los ensayos, se hicieron roturaciones periódicas del suelo (cada 2 semanas durante 3 meses) con herramientas de labranza convencional para representar condiciones de uso agrícola y mantener las parcelas libres de vegetación. Aplicaron 3 lluvias sucesivas de 60, 30 y 15 minutos de duración, respectivamente, con una intensidad promedio

de aproximadamente 150 mm/h. La segunda se aplicó 24 horas después de la primera y la tercera, 15 minutos después de la segunda. Para la primer lluvia, los **coeficientes de escorrentía** obtenidos fueron **0,70** para los Molisoles y **0,90** para los Vertisoles, y la capacidad de infiltración final fue de 8 mm/h para los primeros y nula para los segundos. Para la segunda lluvia, los coeficientes de escorrentía fueron **0,87** y **0,96**, respectivamente y ambas capacidades de infiltración final fueron nulas. Para la tercera lluvia, los coeficientes de escorrentía fueron **0,97** y **0,99**, respectivamente y ambas capacidades de infiltración final fueron nulas.

En el Anexo IV se pueden ver las figuras representando la variación temporal de la tasa de infiltración para cada ensayo.

Los autores también evaluaron el Índice de Erosión para ambos suelos, como cociente entre la pérdida de suelo y la energía de la lluvia, aplicando la clasificación propuesta por Michelena et al. (2000). A partir de estos resultados obtenidos concluyeron que los suelos Molisoles y Vertisoles tienen una **Muy Baja y Baja resistencia a la erosión**, respectivamente. Los resultados coinciden con la literatura internacional, que atribuye una mayor erosionabilidad a los suelos de texturas intermedias (fracción de limos más abundante).

Zimmerman (1995) destaca los procesos de degradación que sufren los suelos de la Llanura Pampeana como consecuencia de la agricultura intensiva, lo que genera una erosión de los mismos y un posterior proceso de sedimentación del material erosionado en los cursos de agua. La erosión genera la formación de costras en la superficie del suelo, una reducción de la infiltración del agua pluvial por impermeabilización y un aumento de la escorrentía.

Del análisis de las investigaciones mencionadas, puede concluirse que la remoción de bosques, montes y vegetación natural desprotege el suelo del impacto de las gotas de lluvia, favoreciendo la compactación y el encostramiento, con lo cual disminuye la infiltración y aumenta el escurrimiento. Además, reduce la evapotranspiración y, en consecuencia, una vía importante de remoción de agua. Sobre un suelo desnudo la resistencia del flujo superficial es menor que para el mismo suelo con cobertura vegetal. En consecuencia, aumenta la velocidad del flujo y la posibilidad de procesos erosivos. La magnitud de estos procesos varía de acuerdo a la textura del suelo superficial y a la pendiente del terreno.

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA APLICADA

5.1. ASPECTOS GENERALES

Se evaluaron los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano, aplicando del modelo AGWA-KINEROS2.

El pre y post-procesamiento de los parámetros y de los resultados de la simulación se realizó trabajando en el entorno del SIG ArcView 3.2.

Los datos básicos que se requieren para la aplicación del modelo son los siguientes: un MDE (formato raster), un mapa de usos/coberturas del suelo (formato raster), un mapa de suelos (formato de polígonos), datos pluviométricos de los eventos a simular correspondientes a estaciones de ubicación conocida y tablas con parámetros del suelo, uso del suelo e hidrológicos.

Se implementó el modelo en la cuenca en estudio, para 3 escenarios distintos de usos/coberturas del suelo, correspondientes a los años 1986, 1997 y 2006. Como el MDE y los mapas de usos/coberturas del suelo no estaban disponibles, debieron elaborarse específicamente para esta Tesis. Los mapas de usos/coberturas del suelo se determinaron a partir de imágenes satelitales Landsat 5, según una clasificación definida para esta Tesis.

Se calibró el modelo con tres eventos precipitación-escorrentía observados, cada uno representativo de los escenarios previamente mencionados.

Se evaluaron los cambios de usos/coberturas del suelo entre los escenarios, así como la distribución espacial de dichos cambios y su relación con el mapa de suelos, usando técnicas de SIG y teledetección.

Se evaluaron los efectos originados por cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos. Los efectos se evaluaron para dos escalas espaciales: a la escala de la cuenca total y a la escala de la subcuenca 253. Para ello, se realizaron corridas del modelo para los tres escenarios de usos/coberturas, considerando como entrada una tormenta sintética de distribución espacial uniforme, una condición de humedad antecedente promedio y los restantes parámetros obtenidos en las calibraciones correspondientes. Se adoptó esta tormenta y esta condición inicial para aislar del análisis los efectos de la distribución espacio-temporal de la lluvia y de la condición de humedad del suelo al inicio de la lluvia.

Se analizaron los resultados obtenidos de la simulación y se relacionaron éstos con los cambios de usos/coberturas del suelo y los tipos de suelo sobre los que se produjeron la mayor cantidad de cambios.

Se describen a continuación las principales características del modelo utilizado y las metodologías aplicadas para determinar el MDE, el mapa de suelos y los mapas de usos/coberturas del suelo para distintos escenarios.

5.2. MODELO KINEROS2

Los procesos hidrológicos se simularon con el modelo KINEROS2 (KINEmatic Runoff and EROSIon) Version 3.2 (Dic/2003), desarrollado por el U. S. Department of Agriculture (USDA, 2003), Agricultural Research Service (ARS).

Este software es de dominio público y puede ser descargado del sitio www.tucson.ars.ag.gov/kineros. La versión original del modelo fue desarrollada por Woolhiser et al. (1990).

Se trata de un modelo determinístico, para simulación de eventos aislados y basado en las ecuaciones de onda cinemática unidimensional. Es de tipo cuasi-distribuido, ya que desagrega la cuenca en segmentos típicos y considera los parámetros de cada uno de éstos en forma agregada.

Como todo modelo basado en las ecuaciones de onda cinemática, aplica dos tipos de simplificaciones: geométrica y de procesos.

La primera, consiste en aproximar la complejidad geométrica del flujo de agua superficial sobre una cuenca por medio de una cascada de segmentos simples, tales como planos de escurrimiento (flujo superficial) y segmentos de canal (flujo en canal), que en conjunto describen las características del drenaje.

La cuenca se desagrega en subcuencas, para reflejar adecuadamente las variaciones en suelo, pendiente, vegetación y precipitación. Cada subcuenca se simplifica como dos planos de escurrimiento que aportan lateralmente a un segmento de canal, más un plano de cabecera para el caso de cursos de primer orden (Figura N° 5.1).

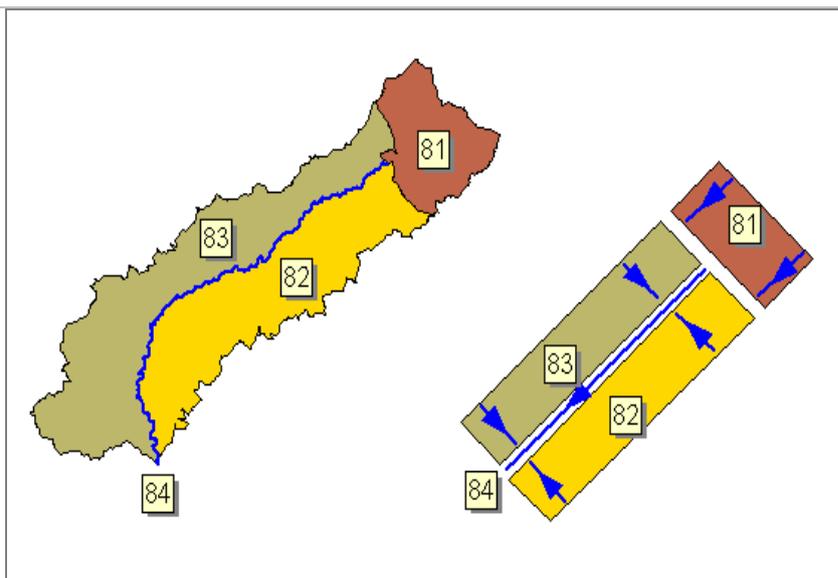


Figura N° 5.1: Desagregación de una cuenca elemental.

A cada elemento se le asignan valores de parámetros apropiados, que describen sus características geométricas, hidráulicas, de infiltración y erosión, tanto como sus conexiones a elementos vecinos.

La segunda simplificación consiste en despreciar los términos de inercia y de presión en la ecuación de momento de Saint Venant para flujo gradualmente variado en canales abiertos.

Flujo superficial

El flujo superficial se idealiza como un flujo unidimensional sobre un plano uniforme.

Si sobre un plano cae una lluvia efectiva de intensidad constante, la ecuación de continuidad se expresa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad (5.1)$$

Q: caudal por unidad de ancho, h: tirante, q: caudal lateral de entrada (intensidad de lluvia efectiva), x: distancia en el sentido del flujo, t: tiempo.

En la ecuación de momento se desprecian los términos de inercia y de presión con respecto a los de gravedad y fricción, resultando la ecuación:

$$S \cong S_f \quad (5.2)$$

S: pendiente de fondo del plano, S_f : pendiente de la línea de energía.

La ecuación (5.2) equivale a plantear una relación biunívoca entre el caudal y el tirante:

$$Q = \alpha h^m \quad (5.3)$$

α y m : coeficientes cinemáticos, dependen de la pendiente y rugosidad del plano y del régimen del flujo.

Reemplazando la ecuación (5.3) en (5.1) se obtiene la ecuación diferencial de onda cinemática para flujo superficial:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (5.4)$$

Para flujo turbulento, los valores de α y m se pueden estimar aplicando la ecuación de Manning, resultando las ecuaciones:

$$\alpha = \frac{S^{1/2}}{N} \quad (5.5)$$

$$m = 5/3 \quad (5.6)$$

N : coeficiente de rugosidad para flujo superficial (diferente al coeficiente de rugosidad para flujo en canales abiertos).

Flujo en canal

Los segmentos de canal reciben como entrada el caudal lateral uniformemente distribuido pero variante en el tiempo, aportado por dos planos laterales, eventualmente desde un plano de cabecera y desde uno a diez canales en el borde de aguas arriba.

Las dimensiones de los planos de escurrimiento se calculan cubriendo completamente la subcuenca, por lo que la lluvia sobre el canal no es considerada directamente.

La ecuación de continuidad para un canal con caudal de entrada lateral se expresa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (5.7)$$

Q : caudal en el canal, A : área mojada, q_c : aporte lateral por unidad de longitud del canal, x : distancia en el sentido del flujo, t : tiempo.

Bajo la hipótesis cinemática, Q puede ser expresado como una función biunívoca del área A y la ecuación (5.7) puede ser reescrita como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (5.8)$$

La ecuación de cantidad de movimiento se expresa:

$$Q = \alpha_c A R^{m_c-1} \quad (5.9)$$

R: radio hidráulico, α_c y m_c : coeficientes cinemáticos del canal, que dependen de la forma, pendiente y rugosidad del canal.

Las ecuaciones diferenciales para flujo superficial y en canal son resueltas usando un método de diferencias finitas implícito de 4 puntos, como muestra el esquema de la Figura N°5.2.

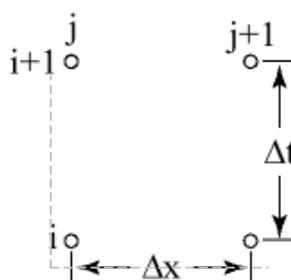


Figura N° 5.2: Esquema del método de diferencias finitas aplicado.

La solución se obtiene mediante el método de Newton-Raphson. Si bien la solución es incondicionalmente estable en un sentido lineal, la precisión depende en gran medida del tamaño de los incrementos de longitud (Δx) y de tiempo (Δt) utilizados. Por defecto, AGWA-KINEROS2 considera un Δt de 1 minuto.

En cuanto al valor de Δx , éste varía para cada segmento, ya sea plano o canal, según la cantidad de nodos. Esta cantidad se calcula para cada elemento a partir de la relación entre la longitud de escurrimiento del mismo (x_{leng}) y una longitud característica (CLEN), cuyo valor se fija para toda la modelación junto con los otros parámetros comunes a todos los elementos (entrada global). El modelo calcula la relación:

$$Rel = 15 * x_{leng} / CLEN \quad (5.10)$$

Si el valor resultante es mayor que 15, el modelo adopta una cantidad de nodos (n_k) igual a 15, en caso contrario la cantidad de nodos adoptada es 5. Por defecto se define el valor de CLEN en 10 m, con lo que la cantidad de nodos en todos los casos es siempre de 15.

Luego, el modelo calcula en valor de Δx para cada segmento con:

$$\Delta x = \text{xlength}/(\text{nk} - 1) \quad (5.11)$$

Intercepción

La intercepción es la porción de precipitación que es retenida inicialmente en la cobertura vegetal y que no llega a la superficie del suelo.

El efecto de la intercepción es controlado por dos parámetros: *la altura de intercepción (INT)* y *la fracción de la superficie cubierta por vegetación (COVER)*.

Lluvia

La lluvia es modelada como espacialmente uniforme sobre cada segmento, pero varía entre segmentos si existe más de un pluviómetro.

La variabilidad espacial y temporal de la lluvia se calcula por interpolación de hasta 20 pluviómetros para cada plano. La ubicación de los elementos es representada por un par simple de coordenadas (x, y).

El interpolador intenta encontrar los 3 pluviómetros más cercanos que encierran las coordenadas del elemento; si tal configuración no existe, busca los 2 pluviómetros más cercanos para los cuales las coordenadas del elemento caen dentro de una faja bordeada por las 2 líneas paralelas que pasan a través de las ubicaciones de los pluviómetros y son perpendiculares a la línea que conecta los 2 puntos. Finalmente, si tales 2 puntos no existen, se usa solamente el pluviómetro más cercano.

Infiltración

El modelo calcula el hietograma de lluvia en exceso descontando al hietograma de lluvia total las pérdidas por intercepción, infiltración y almacenamiento superficial.

KINEROS2 contiene un modelo de infiltración que es una extensión del usado en versión anterior, que simula el frente húmedo en el suelo de manera unidimensional, describiendo la *capacidad de la infiltración (fc)* en función de la *infiltración acumulada (I)*.

La formulación puede ser aplicada para uno o dos horizontes de suelo y permite representar la redistribución de agua en el suelo, incluyendo la recuperación de la capacidad de la infiltración durante los períodos sin lluvia. En este trabajo solo se aplica el caso para un solo horizonte por no existir información básica de mayor detalle.

KINEROS2 requiere los siguientes parámetros del suelo para describir las características de la infiltración: *conductividad hidráulica saturada (Ks)*, *tensión capilar (G)*, *porosidad (ϕ)*, *índice de distribución de poros adimensional (λ)* (Brooks y Corey, 1964),

coeficiente de variación de la conductividad hidráulica saturada ($C_v (K_s)$) y contenido de rocas grandes ($Rock$), que representa el volumen sólido de tamaño grande.

La condición inicial de humedad del suelo se expresa por medio de la *saturación relativa inicial de la capa superior del suelo (SI)*, que es la relación entre la humedad actual disponible y la máxima humedad posible, como se expresa en la ecuación (5.12):

$$SI = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (5.12)$$

La saturación relativa es un valor escalado del contenido en agua. El contenido de agua por unidad de volumen (θ) tiene un límite máximo igual a la porosidad ($\theta = \phi$) y un límite mínimo igual a la humedad residual del suelo después que ha drenado completamente, (θ_r) o humedad que no se puede extraer por medios físicos. Cuando $\theta = \phi$ se da el límite superior de SI, que es 1 y cuando $\theta = \theta_r$ se da el límite inferior de SI, que es 0 ($0 \leq SI \leq 1$).

Siguiendo a Hillel (1971), la capacidad de infiltración (denominada infiltrabilidad por el autor), f_c , se define como la mayor velocidad a la cual el agua puede entrar en la superficie del suelo. El modelo general de una capa de suelo se expresa con las ecuaciones (Parlange et al., 1982):

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\alpha}{\exp(\alpha I / B) - 1} \right] \quad (5.13)$$

siendo:

$$B = (G + h_w) * (\theta_s - \theta_i) = (G + h_w) * \Delta\theta \quad (5.14)$$

f_c : capacidad de infiltración (mm/hr), K_s : conductividad hidráulica saturada del suelo (mm/hr), α : parámetro que representa el tipo de suelo, I : infiltración acumulada (mm); G : tensión capilar (o de succión) neta (mm); h_w : profundidad del agua superficial (mm); $\Delta\theta$: capacidad de almacenamiento unitaria (variación del contenido de humedad del suelo penetrado por el frente húmedo), igual a $(\theta_s - \theta_i)$; θ_s : contenido de humedad del suelo arriba del frente, adoptado igual a la porosidad efectiva ($\theta_s = \phi - \theta_r$), θ_i : contenido de humedad inicial del suelo.

$\Delta\theta$ se puede expresar:

$$\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i) = (1 - SI) * \theta_s \quad (5.15)$$

El parámetro α de la ecuación (5.13) representa el tipo del suelo. Si α se aproxima a 0 (arenas), la ecuación se acerca a la relación Green-Ampt. En cambio, si α se aproxima a 1

(arcillas bien mezcladas), la ecuación de infiltración es la de Smith-Parlange. KINEROS2 considera un valor por defecto de $\alpha = 0,85$.

Es útil observar la relación en términos escalados. Considerando $hw = 0$ (profundidad de encharcamiento nula), se puede definir el valor de B como:

$$B = G * \Delta\theta \quad (5.16)$$

Si se hace un escalamiento de los valores, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{f_c - \overline{K_s}}{\overline{K_s}} = \frac{\alpha}{\exp(\alpha * I/B) - 1} = \frac{\alpha}{\exp(\alpha * I/G * \Delta\theta) - 1} \quad (5.17)$$

$$f_* = \frac{f - \overline{K_s}}{\overline{K_s}} \quad (5.18)$$

$$I_* = \frac{I}{G * \Delta\theta} \quad (5.19)$$

$$r_* = (r - \overline{K_s}) / \overline{K_s} \quad (5.20)$$

Usando el escalamiento según las ecuaciones (5.18), (5.19) y (5.20), la ecuación (5.13) se convierte en:

$$f_{c*} = \frac{\alpha}{\exp(\alpha * I_*) - 1} \quad (5.21)$$

La Figura N° 5.3 ilustra la ecuación (5.21) en coordenadas escaladas.

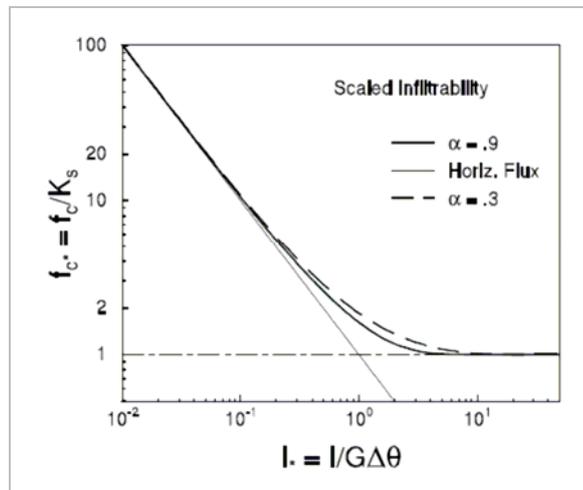


Figura N° 5.3: Capacidad de infiltración escalada en función de la infiltración acumulada escalada

Para los valores de $I^* < 10^{-1}$ (suelo seco), la capacidad de infiltración es muy alta, está dominada por la tensión de succión y se cumple la relación $f_{c^*} = 1/I^*$. Para valores $I^* > 10$ (suelos después de un humedecimiento prolongado), la asíntota es también independiente del valor de α y se cumple que $f_{c^*} = 1$, es decir, la capacidad de infiltración se hace igual a la conductividad hidráulica saturada del suelo, K_s .

Para calcular el parámetro tensión capilar G , se aplica la relación característica del suelo de Brooks y Corey (1964) (5.22).

$$G = \Psi_B \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \quad (5.22)$$

Ψ_B : tensión de succión en el frente (mm); λ : índice de la distribución de poros adimensional, parámetro adicional que usa KINEROS2 para considerar la redistribución del agua en el suelo. Valores elevados de λ corresponden a suelos con poros muy homogéneos y que se desaturan muy rápidamente, como es el caso de las gravas y arenas. Por el contrario, valores pequeños de λ se corresponden con una gradación importante de poros, como la que se dan en las arcillas.

Los valores $\overline{K_s}$ en las ecuaciones (5.18) y (5.20) indican valores medios regionales, que se calculan a partir del coeficiente de variación C_v (K_s), parámetro que se agrega en KINEROS2.

El cálculo de la capacidad de infiltración se actualiza para cada intervalo de tiempo. Una porción inicial de lluvia aumenta la infiltración acumulada I , sin causar escurrimiento, debido a que el valor de f_c es muy grande para pequeños valores de I y se cumple que $f_c \geq r$ (r : intensidad de lluvia). En este caso no existe encharcamiento en el intervalo, todo lo que llueve se infiltra. Cuando la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración, $f_c < r$, existe encharcamiento. La precipitación en exceso acumulada se calcula restando la infiltración acumulada de la precipitación acumulada. Luego, tomando diferencias sucesivas de los valores resultantes se obtiene el hietograma de la precipitación en exceso.

5.3. PROGRAMA AGWA

5.3.1 Aspectos generales

AGWA (Burns et al., 2004) es un conjunto de herramientas de modelación hidrológica que trabaja en el entorno del SIG ArcView 3.x y requiere de la extensión Spatial Analyst para el manejo de estructuras de datos raster.

Permite la generación automática de los archivos de entrada a dos modelos hidrológicos, SWAT y KINEROS2, la ejecución de éstos en segundo plano y la recuperación y visualización de los resultados en el ambiente SIG.

AGWA realiza automáticamente la delimitación de la cuenca y subcuencas y luego la determinación de los parámetros geométricos, de suelo y de usos/coberturas del suelo de cada uno de los segmentos. Para ello, utiliza como datos de entrada el MDE, el mapa de suelos, el mapa de usos/cobertura del suelo y datos de precipitaciones.

Considera la variabilidad espacial de la topografía, de los suelos y de los usos/coberturas del suelo en celdas o píxeles, que es la unidad de discretización espacial (de tamaño constante). Luego desagrega la cuenca en subcuencas, con formato de polígonos, a las que le asigna parámetros uniformes.

La información necesaria para aplicar AGWA es de dos clases, la “básica o requerida” que debe estar disponible al momento de iniciar la aplicación del modelo y la “generada u opcional” que es creada por AGWA durante su aplicación o es generada previamente por otro modelo y se le ingresa como dato. La información se ingresa en tres formatos: Grilla (raster), Temas (shapefiles) y Tablas (extensión dbf), como se indica en la Tabla N° 5.1.

Tabla N° 5.1: Tipo de información necesaria para el modelo AGWA- KINEROS2
 (*) Vienen en el “datafiles” del modelo AGWA

Nombre	Clase	Formato
Cuenca		
MDE	Requerida	Grilla
Dirección de flujo	Opcional	Grilla (enteros)
Flujo acumulado	Opcional	Grilla (enteros)
Red de drenaje	Opcional	Grilla (0-1)
HGR (*)	Requerida	Tabla (dbf)
Uso del suelo		
Mapa Uso del suelo de suelo	Requerida	Grilla (enteros)
Nacl_lut (*)	Requerida	Tabla (dbf)
Suelo		
Mapa de suelo	Requerida	Shapefile (polígono)
FAO_summ (*), FAO_World (*), FAO_properties (*)	Requeridas	Tabla (dbf)
Kin_lut (*)	Requerida	Tabla (dbf)
temp_soil_lut	Creado Temporalmente	Tabla
temp_soil_kin	Creado Temporalmente	Tabla

Para la referenciación cartográfica se usó el sistema POSGAR 94, definido con los siguientes parámetros: Datum WGS84 (World Geodetic System 1984), sistema de proyección Transversa Mercator y sistema de coordenadas Gauss-Krüger-faja5.

5.3.2 Implementación del modelo

Cuando se crea un proyecto en AGWA, en Arc View 3.2 aparece un menú llamado AGWA Tools (Figura N° 5.4).

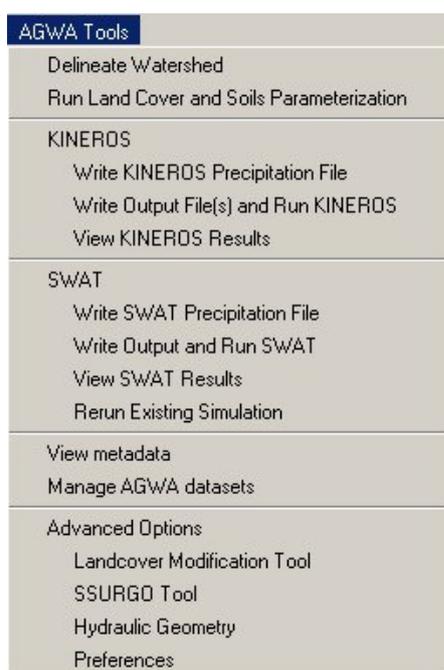


Figura N° 5.4: Menú principal del AGWA Tools

Delineación de la cuenca

A partir de los mapas raster del MDE más la red de drenaje, de dirección de flujo y de flujo acumulado, el programa AGWA permite delimitar la cuenca y subcuencas (Figura N° 5.5). Para ello, se debe definir la sección de salida (shapefile tipo punto).

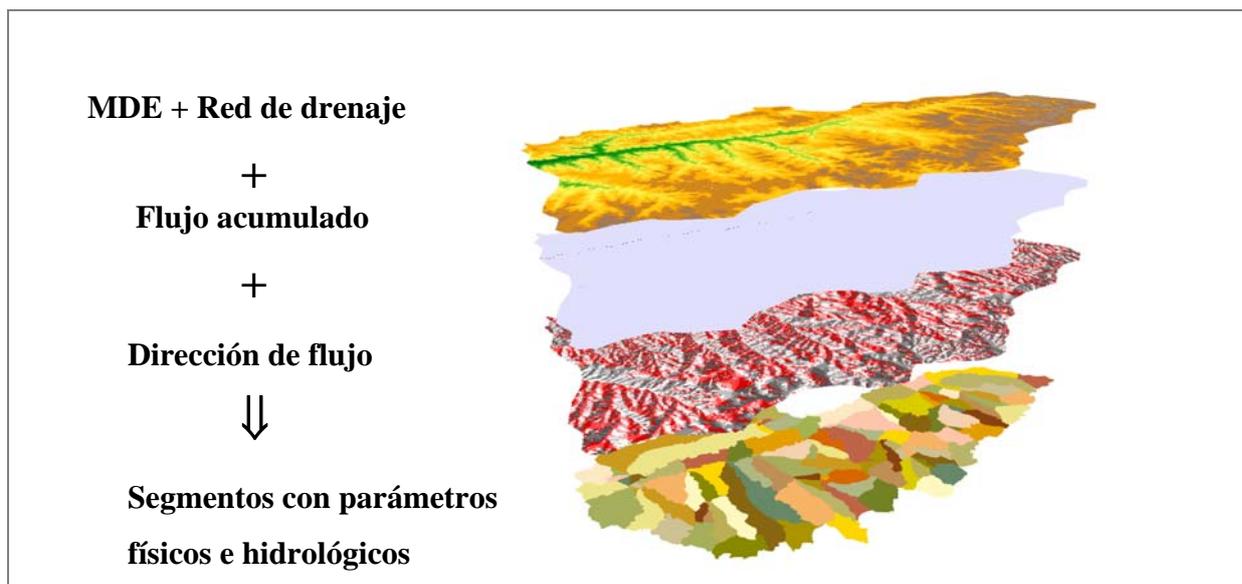


Figura N° 5.5: Esquema del proceso de delimitación de la cuenca

Existen distintos métodos que permiten la delimitación de cuencas y subcuencas de manera automática a partir de un MDE. En el Anexo V se describen distintos métodos de delimitación de subcuencas a partir de un mismo mapa raster de *dirección de flujo* y *flujo acumulado* y sus fundamentos teóricos.

La delimitación de la cuenca consiste en establecer los límites de la cuenca y desagregarla en subcuencas según un valor del parámetro “área umbral de contribución” (Contributing Area Threshold Value, CSA), fijado por el usuario. AGWA permite generar automáticamente distintos niveles de desagregación espacial de la cuenca por medio de dicho parámetro, cuyo valor es ingresado por el usuario como porcentaje de la superficie total de la cuenca o como superficie en hectáreas.

Este parámetro representa el límite a partir del cual una celda comienza a formar parte de la red de drenaje. Cuanto menor es el valor del área umbral, las celdas drenan con menor acumulación de flujo, la red de drenaje se representa con mayor grado de detalle y se genera una mayor cantidad de subcuencas.

A ambos márgenes de cada segmento de canal se generan automáticamente 2 subcuencas laterales y para los canales de primer orden, una subcuenca de cabecera. Cada subcuenca se identifica con el número “WS#” (#: 1 para las cabeceras, 2 margen izquierda y 3 margen derecha). Los segmentos de canal se identifican con el número “Stream#” (#: consecutivo al número de las subcuencas que le aportan).

AGWA calcula internamente el valor de los parámetros físicos a nivel de píxel. Luego, genera como salida dos capas vectoriales (shapefile) de distintos formato, polígono para las subcuencas y línea para los canales.

Cada uno de estos archivos tiene asociada una tabla de atributos con parámetros geométricos, hidrológicos, de suelos y de usos/coberturas del suelo, que se van calculando en cada paso.

En un primer paso el modelo calcula los parámetros geométricos de las subcuencas (Tabla N° 5.2) y de los segmentos de canal (Tabla N° 5.3).

Tabla N° 5.2: Parámetros calculados en el shapefile subcuenca en la delineación de la cuenca

Parámetro	Descripción
ID	Número de identificación de la subcuenca
WS_	Número de subcuenca
AREA	Superficie de la subcuenca (m ²)
SLOPE	Pendiente media en porcentaje
MEAN_Z	Cota media (m)
CENTROID_X	Coordenada X del centroide (m)
CENTROID_Y	Coordenada Y del centroide (m)
WIDTH	Ancho de la subcuenca (m)
LENGTH	Longitud de la subcuenca (m)

Tabla N° 5.3: Parámetros calculados en el shapefile canal en la delineación de la cuenca.

Parámetro	Descripción
STREAM#	Número de identificación del tramo de canal
	Número de las subcuencas (WS_) que aportan lateralmente
CONT_CHAN	Número de las subcuenca (WS_) que aporta desde aguas arriba
LENGTH	Longitud del tramo de canal (m)
X_VAL	Coordenada X del centroide del tramo de canal (m)
Y_VAL	Coordenada Y del centroide del tramo de canal (m)
ORDER	1 si es primer orden (cabecera), 99 si es intermedio
SLOPE	Pendiente del canal calculado con las cotas de los extremos
UP_WIDTH	Ancho de la sección aguas arriba (m)
DOWN_WIDTH	Ancho de la sección aguas abajo (m)
UP_DEPTH	Profundidad de la sección aguas arriba (m)
DOWN_DEPTH	Profundidad de la sección aguas abajo (m)
MAN	Coefficiente de rugosidad de Manning (0,035)
SS1	Talud margen izquierda (1)
SS2	Talud margen derecha (1)
WOOL	(YES)
CV	Coefficiente de variación de KSAT (0)
KSAT	Conductividad hidráulica saturada (210 mm/hr)
G	Tensión capilar media (101 mm)
DIST	Índice de distribución del tamaño de los poros (0,545)
POR	Porosidad (0,44 cm ³ /cm ³)

Parámetro	Descripción
ROCK	Fracción volumétrica de roca.
PCT_CLAY	Fracción de arcilla (0-1) (0,05)
PCT_SILT	Fracción de limo (0-1) (0,05)
PCT_SAND	Fracción de arena (0-1) (0,90)
SP	Coefficiente de salpicadura (63)
COH	Coefficiente de cohesión del suelo (0,005)
SEQUENCE	Valor entero que indica la secuencia del canal
AREA	Área que contribuye directamente al tramo del canal aguas arriba y lateral (m ²)
CUM_AREA	Área total que contribuyen al tramo del canal (m ²)

() valores por defecto

La longitud de las subcuencas se adopta igual a la longitud del segmento de canal asociado. Luego, el programa calcula el ancho como el cociente entre el área de la subcuenca y la longitud, considerando el plano como un rectángulo.

En el caso que la subcuenca sea cabecera, se la asimila a un triángulo y la longitud se calcula como el 3/2 de la distancia entre el centroide del plano y el nodo aguas abajo, como se muestra en la Figura N° 5.6.

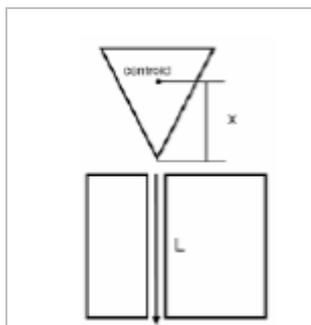


Figura N° 5.6: Esquematización para el cálculo de las longitudes de subcuencas (Fuente: Manual del AGWA 1.5)

El programa calcula automáticamente el ancho y la profundidad en las secciones extremas de cada segmento de canal a partir de las siguientes relaciones geométricas (HGR), en función del área de aporte acumulada hasta cada sección:

$$B = C1 A^{C2} \tag{5.23}$$

$$H = C3 A^{C4} \tag{5.24}$$

B: ancho del canal (m); A: superficie de aporte hasta la sección (m²); H: profundidad del canal (m) y C1, C2, C3 y C4 son coeficientes que se ingresan en la tabla HGR.dbf.

AGWA tiene por defecto 2 relaciones geométricas obtenidas en North Carolina's Coastal Plain y Walnut Gulch Watershed de Arizona, cuyos parámetros están definidos en la tabla HGR. Estas relaciones geométricas son representativas de cursos de regiones semiáridas y no reflejan las características morfológicas de la red de drenaje de la cuenca en estudio. En base a aforos y a la interpretación de imágenes satelitales de la cuenca en estudio, se determinaron los anchos y profundidades para distintas secciones de control y se ajustaron las expresiones para la misma.

El programa asigna por defecto un mismo valor de algunos parámetros a todos los segmentos de canal, como por ejemplo el coeficiente de rugosidad de Manning y parámetros del suelo. Los valores por defecto corresponden a un suelo muy arenoso (zona árida), situación que difiere a la de los cursos de la cuenca en estudio. Por ello, se modificaron los valores de la tabla, asignándole los parámetros correspondientes a suelos con alto contenido de arcilla y una rugosidad representativa del caso de aplicación.

Parametrización de suelos y de usos/coberturas del suelo

En este paso se asignan a las subcuencas los parámetros asociados a los tipos de suelos y a usos/coberturas del suelo, a partir de los mapas respectivos, como se esquematiza en la Figura N° 5.7.

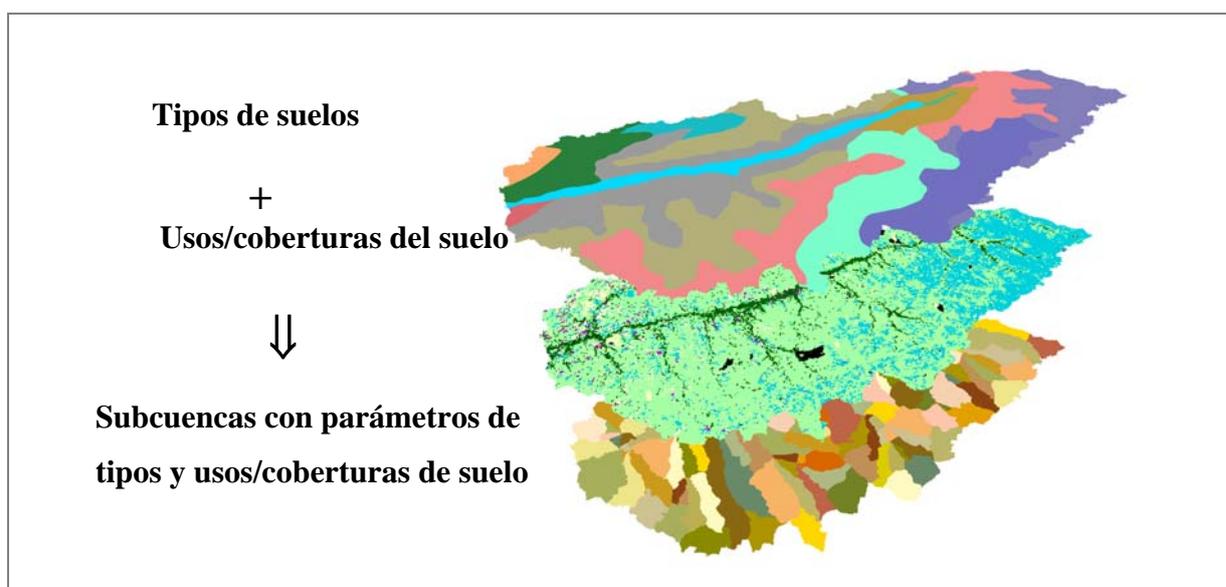


Figura N° 5.7: Esquema del proceso de parametrización de suelos

Los parámetros calculados se agregan automáticamente a la tabla de atributos de las subcuencas.

Para la parametrización de *usos/coberturas del suelo*, el modelo realiza la intersección entre el mapa raster de usos/coberturas del suelo, la tabla *nalc_lut*, que contiene las características de usos/coberturas del suelo y el mapa raster de la cuenca.

La tabla de atributos del mapa de usos/coberturas del suelo tiene dos campos: *value* y *count*. El campo *value* debe contener números que se asociaron al campo “*class*” de la tabla *nalc_lut*. Se modificó la tabla *nalc_lut.dbf* original para describir los tipos de usos/coberturas del suelo según la clasificación definida para este trabajo.

La parametrización del *tipo de suelo* consiste en la extracción de parámetros hidrológicos de las tablas *FAO_World*, *FAO_Properties*, *FAO_Summ* y *kin_lut.dbf* y en la adición de esta información a la tabla de atributos de las subcuencas.

En primer lugar, el modelo busca el identificador de cada tipo de suelo (SNUM) en el shapefile de suelo y establece una relación con la tabla *FAO_World*, que contiene las unidades de suelo. A su vez, se relaciona con las otras tres (*FAO_Properties*, *FAO_Summ* y *kin_lut*) que contienen la textura y otras propiedades de los suelos (Anexo VI). Estas cuatro tablas se complementan, el modelo busca la información en la primera, luego en la segunda, en la tercera y hasta llegar a la cuarta. La última asocia la textura con parámetros hidráulicos del suelo, como conductividad hidráulica saturada, tensión capilar media, porosidad, índice de distribución del tamaño de los poros y coeficiente de variación de la conductividad hidráulica saturada. Para obtener el valor promedio de cada parámetro hidrológico por segmento, el modelo intercepta las capas de cuenca y tipo de suelo y realiza una ponderación areal de las propiedades. Esto significa que si más de un tipo de suelo intercepta una misma subcuenca, el modelo calcula el porcentaje de presencia de cada SNUM según la superficie que ocupa y calcula el valor ponderado areal.

A la tabla de atributos de la subcuencas se le agregan nuevos campos o parámetros, como se muestra en la Tabla N° 5.4.

Tabla N° 5.4: Parámetros calculados en el shapefile subcuenca en la parametrización de la cuenca, uso del suelo y tipo de suelo

Parámetro	Descripción	Origen
INT	Altura de intercepción (mm)	Uso del suelo
COVER	Fracción de superficie cubierta por uso del suelo (%)	Uso del suelo
MANN_N	Coefficiente de rugosidad de Manning para la cuenca	Uso del suelo
PCT_IMPERV	Porcentaje Impermeable (%)	Uso del suelo
PAVE	Fracción de superficie erosionable (0-1)	Tipo de suelo
SPLASH	Coefficiente de salpicadura	Tipo de suelo
ROCK	Fracción volumétrica de roca	Tipo de suelo
KS	Conductividad Hidráulica Saturadada (mm/hr)	Tipo de suelo
G	Tensión capilar media (mm)	Tipo de suelo

Parámetro	Descripción	Origen
POR	Porosidad (ϕ)(cm ³ /cm ³)	Tipo de suelo
SMAX	Máxima Saturación relativa	Tipo de suelo
CV	Coefficiente de variación de KS	Tipo de suelo
PCT_SAND	Fracción de arena (0-1)	Tipo de suelo
PCT_SILT	Fracción de limo (0-1)	
PCT_CLAY	Fracción de arcilla (0-1)	
DIST	Índice de distribución del tamaño de los poros (λ)	Tipo de suelo
COHESION	Coefficiente de cohesión del suelo	Tipo de suelo

Generación de archivos de precipitación

El modelo requiere como dato un archivo de precipitaciones, que se guarda en el directorio “rainfall” con extensión “*.pre”. Este archivo debe tener una determinada estructura para que AGWA lo interprete correctamente.

Hay varias opciones para la generación de archivos de precipitación. En este trabajo se generaron dos tipos de archivo: a) para la calibración del modelo, se utilizaron los datos de lluvia de varias estaciones pluviométricas distribuidas dentro y fuera de la cuenca y b) para la explotación del modelo, se consideró una tormenta sintética uniforme en toda la cuenca.

Un parámetro requerido por KINEROS2, que puede variar para cada evento, es la *saturación relativa inicial de la capa superior del suelo (SA)*.

Intervalo de tiempo computacional

El tiempo de equilibrio es el tiempo requerido por una onda cinemática infinitesimal para trasladarse desde la cabecera de un segmento (subcuenca o canal) hasta la sección de salida, cuando se ha alcanzado un equilibrio cinemático completo. Su valor depende de la rugosidad, longitud y pendiente, así como la intensidad de lluvia en exceso.

Para un plano de escurrimiento, el tiempo de equilibrio en segundos se calcula con la expresión:

$$te = \left[\frac{N * L}{S^{1/2} * i^{2/3}} \right]^{3/5} \quad (5.25)$$

S: pendiente (m/m), N: coeficiente de rugosidad de para flujo superficial, L: longitud en el sentido del escurrimiento (m), i: intensidad de la lluvia en exceso (m/seg).

A partir del menor tiempo de equilibrio de las subcuencas se puede adoptar el intervalo de tiempo de simulación, Δt . Para tener una solución con mínimo error de

continuidad se debe adoptar un Δt que permita definir el hidrograma con al menos 5 ordenadas no nulas hasta el tiempo de equilibrio; es decir, se debe cumplir con la condición:

$$\Delta t \leq 0.2 * t_e \quad (5.26)$$

5.3.3 Corrida de simulación

Una vez que la cuenca ha sido delineada, discretizada y calculados sus parámetros se puede ejecutar una simulación de KINEROS2.

Para correr el modelo KINEROS2 se crea una simulación a la que se le asigna un nombre, que automáticamente se agrega en un subdirectorio del directorio “simulation”. Se deben seleccionar los siguientes datos:

- a) Selección de la cuenca: se elige de la lista desplegable que aparece con los nombres de las distintas cuencas ya creadas.
- b) Selección del archivo de parámetros (metadatos): el modelo crea un archivo de parámetros con el nombre que se le indica y extensión “*.par” a partir de los datos de las subcuencas (plane element) y los segmentos de canal (channel element), como las características físicas, de suelos y de usos/coberturas del suelo que ya fueron incorporadas en los atributos de los shapefile correspondientes.
- c) Selección del archivo de precipitación: se elige de la lista desplegable que aparece con los nombres de los eventos ya creados y que se guardaron en el directorio “rainfall” con extensión “*.pre”.

Cuando se crea el archivo de parámetros, existe la opción de multiplicar algunos parámetros de canal y de subcuenca por un valor constante. Esto permite modificar en forma simultánea los valores de un parámetro para todos los segmentos del esquema topológico (Figura N° 5.8).

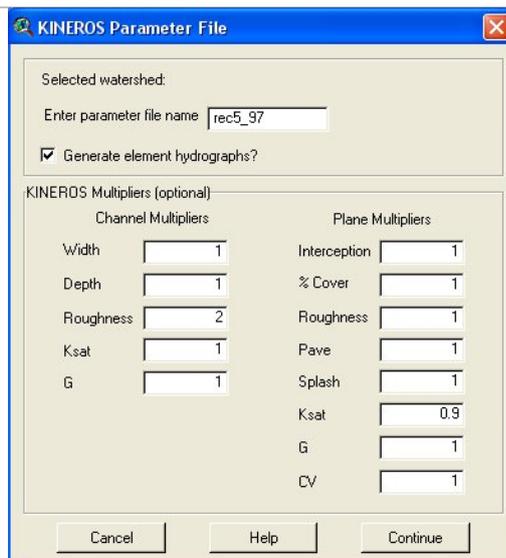


Figura N° 5.8: Vista del menú para aplicar multiplicadores

Los multiplicadores (*multipliers*) sirven para calibrar el modelo, pudiendo variar entre 5 y -5 (excepto cero), ya sea para el canal como para la subcuenca, así el resultado de multiplicar cada valor original por el valor ingresado es guardado en el archivo de parámetros. Esto no modifica los valores de la tabla de atributos de los shapefile.

5.3.4 Despliegue de resultados

Los resultados se guardan automáticamente en el subdirectorio “simulations”, con el nombre dado al archivo de salida de la corrida y distintas extensiones “*.par”, “*.out”, “*.sim”.

Los resultados se agregan como atributos a los temas de las subcuencas y segmentos de canal (Tabla N° 5.5).

Tabla N° 5.5: Resultados obtenidos de la simulación para cada tipo de segmento

Resultados de las subcuencas (Plane Outputs)	Resultados de los canales (Stream Outputs)
Infiltr_m: Infiltración (mm). Infiltr_e: Infiltración (in). Runoff_mm: Esgurrimiento directo (mm). Runoff_m3: Esgurrimiento directo (m ³). Sed_out: Sedimento anual (kg/ha). Pflow_m3s: Caudal máximo (m ³ /s). Pflow_mmh: Caudal máximo (mm/hr). PSedQ_kgs: Caudal máximo sólido (kg/s). Percent Error: error en el balance de volúmenes (%).	Infiltr_m: Infiltración (mm). Infiltr_e: Infiltración (in). Runoff_mm: Esgurrimiento directo (mm). Runoff_m3: Esgurrimiento directo (m ³). Sed_out: Sedimento anual (kg). Pflow_m3s: Caudal máximo (m ³ /s). Pflow_mmh: Caudal máximo (mm/hr). PSedQ_kgs: Caudal máximo sólido (kg/s). Z_change: channel scour (mm/m ²). Percent Error: error en el balance de volúmenes (%).

De esta manera el modelo permite visualizar la salida que se desee y representarla en la vista de ArcView como resultado, lo que se denomina “pos-procesamiento”.

Para auxiliar al análisis comparativo entre distintas simulaciones, el modelo permite calcular una diferencia ya sea en porcentaje o en valor absoluto con la operación:

$$\text{Diferencia} = (\text{simulación 1} - \text{simulación 2}) / \text{simulación 1} * 100 \quad (5.27)$$

5.4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN Y RED DE DRENAJE

Un MDE es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). Es una estructura de datos porque, además de la lista de coordenadas y altitud, guarda internamente relaciones espaciales y topológicas. De forma genérica, puede representarse mediante la ecuación $z = f(x, y)$, que define un campo de variación continua de la superficie del terreno. La imposibilidad de resolver esta ecuación para todos los puntos del territorio obliga a definir elementos discretos, que permiten simplificar la codificación de la elevación.

Dado que en la cuenca en estudio no se disponía de un MDE, para esta Tesis se procedió a elaborar un modelo raster con celdas de 30m x 30m, donde cada celda contiene el valor de elevación del terreno natural.

Captura de la información de forma vectorial

Existen diversos métodos para la captura de la información planialtimétrica en el proceso de construcción de un MDE. En este trabajo se aplicó el *Método Indirecto de Digitalización* de curvas de nivel y puntos acotados de un mapa topográfico digital (escaneado). Se generó así un archivo con coordenadas (x, y, z) de todos los puntos, que fue utilizado como dato original para el proceso de interpolación.

Interpolación

La construcción de un MDE es básicamente resolver un problema de interpolación, para pasar la información vectorial distribuida en forma irregular a una malla regular. Para ello se utilizan procedimientos matemáticos que interpolan el valor de la cota en puntos ubicados en una determinada posición de una malla regular, a partir de los valores conocidos en puntos vecinos en la misma área o región, ubicados irregularmente.

Existen diversos algoritmos que realizan dicha interpolación, algunos de los cuales están incluidos en el ArcView GIS 3.2 (con la extensión Spatial Analyst y 3D Analyst). Para esta Tesis se aplicaron los siguientes: a) De la variable regionalizada (Kriging), b) Inverse Distance to a Power (IDP), c) Mínimun Curvature, d) Natural Neighbor y e) Red irregular de triángulos (TIN).

Para calcular el error de cada uno de los métodos de interpolación aplicados y así elegir el mejor método, se utilizó el software Surfer 8, que permite realizar interpolación y cartografía en 2D y 3D. La cartografía y análisis se hacen sobre una matriz o retícula, de ahí que el módulo GRID sea uno de los más importantes. A partir de un archivo ASCII con formato (x, y, z) de puntos irregularmente ubicados, interpola los mismos dando como resultado una grilla regular de puntos separados entre sí por una distancia determinada, en un archivo de formato *.GRD, utilizando un algoritmo de interpolación especificado (Kriging, etc).

La calidad de un MDE en formato raster depende tanto de los errores presentes en los datos con los que se ha elaborado, como del procedimiento de interpolación que se ha llevado a cabo.

Los errores debidos a los diversos métodos de interpolación pueden estimarse con el error de altitud en un punto (x, y) calculado como la diferencia entre el archivo dato y la grilla interpolada. El programa Surfer 8 permite conocer dicha diferencia, calculando un archivo ASCII de las diferencias Dif (residual), según la fórmula siguiente:

$$\text{Dif} = \text{Zdat} - \text{Zgrid} \quad (5.28)$$

Los errores calculados los agrega como una columna nueva en la tabla del archivo dato, según se especifique. Esto es muy útil para comparar los distintos métodos de interpolación y elegir el de menor error medio.

En la aplicación para esta Tesis, el menor error se obtuvo con el método Kriging, por lo que se adoptó este método de interpolación.

Obtención del MDE en formato raster

Para generar el MDE raster se exportó la grilla creada en Surfer a ArcView, manteniendo activada la Extensión Spatial Analyst. Se contempló que el MDE cubra una superficie mayor a la de la cuenca en estudio, para luego poder delimitar automáticamente la cuenca total.

Se aplicó un algoritmo para rellenar las depresiones o pozos en el MDE, que se originan artificialmente en el proceso de interpolación.

Se aplicó el procedimiento de “marcación a fuego de los canales” (“Stream – Burning”) en el MDE. Consiste en imponer la red de drenaje al MDE, de manera que cuando se realice el análisis de flujo, se lo fuerce a seguir por dicha red hasta el punto de salida.

Como el modelo AGWA no tiene esta opción, se aplicó manualmente el procedimiento a través de operaciones espaciales en ArcView GIS.

La utilización en forma conjunta de varios programas, como AutoCadMap 2000, ArcviewGIS y Surfer 8, permitió la elaboración de un MDE final en formato raster que refleja de manera satisfactoria el relieve de la cuenca, minimizando los errores de captura de datos e interpolación.

Obtención de los mapas de flujo acumulado y dirección de flujo

Un MDE no solamente contiene información explícita acerca de la altitud en un área de trabajo en diversas celdas (modelo raster), sino que también aporta información relativa a las relaciones (distancia y vecindad) entre los diferentes valores de altitud.

Esto hace que a partir del MDE se puedan generar mapas raster de *dirección de flujo* y *flujo acumulado*, para luego delimitar la cuenca y subcuencas, que son áreas de drenaje que aportan a un punto de salida, que debe estar identificado por un Shapefile tipo punto.

Existen varios modelos que construyen los mapas raster de *dirección de flujo* y *flujo acumulado* y a partir de estos la delimitación de subcuencas. Si bien AGWA tiene una opción para calcular estos mapas en la rutina de delimitación de las subcuencas, para esta Tesis se aplicó el programa CRWR – Prepro (Maidment et al., 2000). Este programa fue desarrollado para ESRI, por lo que es compatible con ArcView GIS. Requiere de la extensión Spatial Analyst para el manejo de estructuras de datos raster e incluye rutinas de relleno y creación de los raster de flujo acumulado y dirección de flujo.

El mapa de *dirección de flujo* (“flow direction”) se genera aplicando el algoritmo de ocho direcciones (Fairfield et al.,1991), que asigna a cada celda un código correspondiente a la dirección del flujo, en base a la pendiente máxima de cada celda con respecto a sus ocho vecinas (Figura N° 5.9). Se supone que el flujo de agua toma el sentido y dirección de acuerdo a la pendiente máxima.

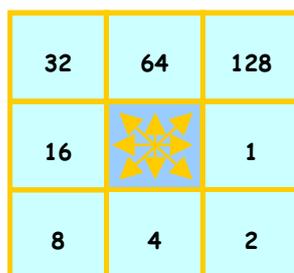


Figura N° 5.9: Algoritmo de ocho direcciones (Fuente: Olivera, 2006)

El mapa de *flujo acumulado* (“flow accumulation”) es una medida del área de drenaje en unidades de celdas de la grilla. En la Figura N° 5.10 se puede ver un ejemplo de ambos mapas raster.

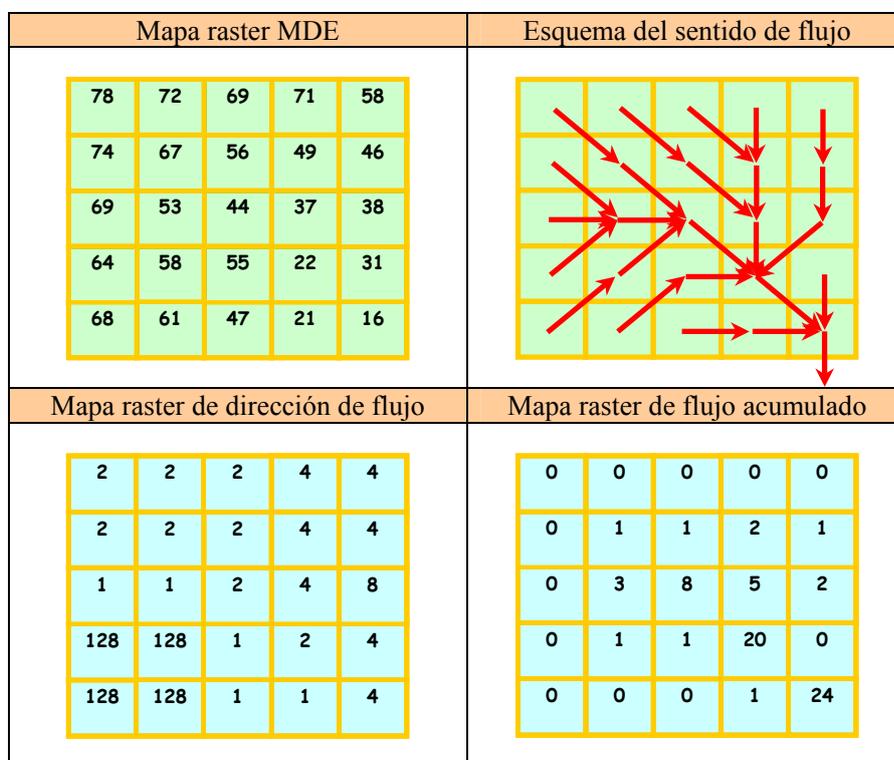


Figura N° 5.10: Esquemas de mapas raster de dirección de flujo y de flujo acumulado (Fuente: Olivera, 2006)

Las tareas realizadas para obtener el MDE de la cuenca en estudio y los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 6.

5.5. MAPA DE SUELOS

Existen numerosas clasificaciones de suelos, desarrolladas desde diferentes puntos de vista. Las clasificaciones con mayor aceptación con base morfométrica, o sea que utilizan propiedades medibles del suelo, son: a) Soil Taxonomy, presentada por el Soil Survey Staff de los Estados Unidos (SSS-USDA) y b) FAO, utilizada para la obtención de mapas de suelos a nivel mundial.

En 1982, FAO inició un proyecto para crear un sistema de clasificación de suelos de aceptación general en el ámbito mundial, apoyada por el programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP) y la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS). Es así que en 1998 se publicó el proyecto denominado Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB), que fue adoptado por la International Union of Soil Science (IUSS) como sistema

La información básica original de *suelos* para esta Tesis se obtuvo del “Atlas de Suelos de la República Argentina” (Aeroterra et al., 1995), que está disponible en formato digital. A partir del mapa nacional se obtuvo el correspondiente a la cuenca en estudio, identificándose 13 tipos de suelo (Figura N° 3.7 y Tabla N° 3.8).

Dicho mapa nacional utiliza la clasificación de suelos del Soil Taxonomy (1994), la cual no es reconocida por AGWA. Para solucionar esto, se elaboró un mapa de suelos de la cuenca en estudio con la clasificación FAO, en base a la información del INTA. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 6.

5.6. MAPAS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO

Se elaboraron 3 mapas raster de usos/coberturas del suelo, correspondientes a los años 1986, 1997 y 2006. Para ello, se procesaron 3 imágenes satelitales representativas de los escenarios de usos/coberturas de esos años.

Los programas utilizados para el procesamiento de las imágenes fueron: Idrisi Kilimanjaro, para realizar las correcciones atmosféricas y radiométricas y ERDAS IMAGINE 8.2, para la corrección geométrica y la clasificación.

Se trabajó con imágenes del satélite Landsat 5 TM, por su alta resolución espacial (tamaño del píxel 30 m x 30 m), muy buena resolución espectral y frecuencia temporal adecuada. Este satélite registra en las 3 bandas del espectro visible (B1, B2 y B3), 1 banda en el infrarrojo cercano (B4), 2 bandas en el infrarrojo medio (B5 y B7) y 1 banda en el infrarrojo térmico (B6) (esta última no se utilizó en este trabajo). Las longitudes de onda correspondientes se muestran en la Tabla N° 5.6.

Tabla N° 5.6: Longitudes de onda de las bandas utilizadas en el trabajo.

Banda	Espectro	Longitud de onda (µm)
1	Azul	0.45 – 0.52
2	Verde	0.52 – 0.60
3	Rojo	0.63 – 0.69
4	Infrarrojo Cercano	0.76 – 0.90
5	Infrarrojo Medio	1.55 – 1.75
7	Infrarrojo Medio	2.08 – 2.35

El procesamiento realizado a cada imagen satelital comprendió las tareas de pre-procesamiento, realce y clasificación supervisada. Se describen a continuación cada una de éstas.

a) Pre-procesamiento*Corrección radiométrica y atmosférica*

Los valores de los píxeles en las imágenes digitales expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados llamados Números Digitales (ND). En el caso de las imágenes Landsat 5 TM, varían en 256 valores, en función de la radiancia recibida en una de las bandas espectrales.

La información expresada en ND es relativa, a mayor ND mayor reflectividad (relación entre energía reflejada y energía incidente), y no es adecuada para comparar imágenes de distintas fechas. En cambio, los valores de reflectividad sí son comparables para distintos lugares y distintas fecha, pues es una variable física.

La reflectividad de una cubierta depende de sus características físicas y químicas, así como de las condiciones de observación y varía en cada banda del espectro. Por eso se le añade el calificativo de espectral, acotando su medida a un determinado rango de longitudes de onda.

Cuando se quiere hacer una comparación entre imágenes de distintas fechas de la misma zona, es necesario calcular la reflectividad espectral. Se deben realizar correcciones radiométricas para mejorar la reflectancia medida en los sensores (energía reflejada) y obtener la reflectancia en superficie. Para ello, se eliminan ruidos y se realizan correcciones atmosféricas, en función de parámetros propios de cada imagen, como la elevación del sol, hora, fecha y otros.

La influencia de la atmósfera no afecta igual a los dos términos del cálculo de la reflectividad, energía incidente (flujo descendente) y energía reflejada (flujo ascendente), ya que el espesor de la atmósfera es distinto. Además hay que considerar que la radiancia que llega al sensor al atravesar la atmósfera es modificada por efecto de la dispersión (moléculas de los gases y partículas de aerosol) y la absorción; por lo tanto, no es la misma que sale del suelo. Entonces, la conversión de los ND a reflectividades tiene dos fases: 1) conversión del valor ND a valores de radiancia espectral (L) a partir de los coeficientes de calibración del sensor, por eso a este procedimiento se lo llama “calibración” y 2) estimación de los valores de reflectividad aparente, conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición de la imagen. Así se remueve el efecto producido por el ángulo solar y se compensan las diferencias en los valores de radiancia solar extra-atmósfera (Chuvieco, 2000).

La relación entre ND y la radiancia espectral es de tipo lineal. La ecuación de radiancia para cada banda espectral de las imágenes Landsat es:

$$L = \text{Gain} * \text{ND} + \text{Bias} \quad (5.29)$$

L: radiancia (watts/(m²* estereoradian * μm); Gain: ganancia (pendiente); Bias: compensación o sesgo (ordenada al origen) .

Para el máximo valor de ND (generalmente 255) la radiancia es la máxima medida por un sensor en el ancho de banda espectral del canal, $L = L_{\text{máx}}$. El valor mínimo $L_{\text{mín}}$ es la radiación espectral correspondiente al mínimo valor de ND (usualmente 0).

Los valores de Gain y Bias varían para cada sensor y cada banda. Dichos valores generalmente están en los metadatos de la imagen (header) o en tablas según la fecha de la imagen. Con estos valores se calculan $L_{\text{máx}}$ y $L_{\text{mín}}$.

Para la corrección atmosférica existen distintos métodos, uno de ellos es el de Costo (COST), propuesto por Chávez en 1996. “En este caso se considera que la radiancia espectral descendente es nula pero la transmitancia atmosférica se estima en función del coseno del ángulo cenital solar ($90^\circ - \text{elevación solar}$) y el camino de radiancia debido a la bruma es estimado especificando el ND_0 de un objeto oscuro que tendría reflectancia nula (p.e. lagos profundos claros) y la radiancia difusa del cielo es considerada nula” (Brizuela et al., 2007).

Para obtener el ND_0 (Dn haze) de objetos oscuros se utiliza el histograma de frecuencias de cada banda. El valor es el que iguala o supera por primera vez el 0.01% de frecuencias relativas acumuladas de cada banda. Este valor es restado en cada banda.

Las correcciones radiométrica y atmosférica se realizaron con el el modelo COST del módulo ATMOSC del programa Idrisi Kilimanjaro.

Corrección geométrica

A la imagen obtenida en el paso anterior se la corrigió para llevarla a la proyección cartográfica definida para esta Tesis. Esto se realizó mediante el proceso de georeferenciación o remuestreo, el cual transforma la matriz original de la imagen, estirándola o comprimiéndola para adecuarla al sistema de referencia deseado.

El procedimiento consistió en asignar, con el menor error posible, coordenadas de puntos de control a coordenadas en otro sistema para los mismos puntos de la misma imagen, creándose dos archivos, el de los puntos de referencia identificados en la imagen georeferenciada y los a proyectar (input).

Ventana de trabajo

Para no realizar la clasificación en toda la imagen se definió una zona de trabajo menor, que cubre la totalidad de la cuenca en estudio.

b) Realce

Se trabajó con una composición color RGB 453, llamada Falso Color Mejorado, y a veces RGB 754. Además, se realizaron realces a las imágenes aplicando la función de transformación de desvíos estándar (“Standard Deviations”).

c) Clasificación Supervisada

La clasificación es un proceso que convierte los valores radiométricos, obtenidos luego de la corrección radiométrica y geométrica, de las 6 bandas de trabajo que componen una imagen, en una nueva imagen temática, donde el valor del píxel es un número que representa la clase o uso/cobertura del suelo resultante de la clasificación.

Una buena clasificación depende de 2 factores: i) La presencia de firmas espectrales distintivas para las clases de uso del suelo que se desea identificar, en el grupo de bandas en uso. ii) Distinguir con precisión las distintas firmas.

Para esta Tesis se definieron nueve (9) clases de uso del suelo, en función de los objetivos del estudio y se aplicó el software ERDAS para la clasificación supervisada.

Creación de los sitios de entrenamiento y firmas espectrales

Definidas las clases de uso del suelo, se creó la firma espectral. Para ello, se definieron los denominados “sitios de entrenamiento”, que son muestras representativas de cada clase identificadas en la imagen a clasificar.

ERDAS posee dos métodos para identificar los sitios de entrenamiento, utilizando la herramienta Áreas de Interés (AOI): a) creando polígonos manualmente y b) buscando los píxeles contiguos que tienen valores similares a un píxel semilla indicado (“Region Grow”) y verificando la homogeneidad en cada sitio.

Fase de Asignación

Existen dos tipos de clasificadores, los llamados duros y los blandos o difusos. Estos últimos no hacen una toma de decisión definitiva sobre a que clase de uso del suelo pertenece un píxel, sino que indica la probabilidad que tiene de pertenecer a una o más clases.

Las nuevas técnicas de clasificación difusa (*fuzzy*) consideran una pertenencia borrosa a una categoría cuando se admite un grado de pertenencia, a diferencia de los métodos duros que consideran una sola categoría potencial para cada píxel. O sea que cada píxel se etiqueta en varias categorías, con un valor más o menos alto en función de su similitud espectral. Esto es muy útil cuando se trabaja con píxeles de 30x 30m, pues es muy probable que un píxel contenga más de una uso del suelo.

Cuando se realiza la clasificación supervisada, ERDAS tiene la opción de aplicar también la lógica Fuzzy para las 2 mejores clases de pertenencia, para lo cual se crea una imagen de distancia.

Para hacer la asignación de la primera clasificación se utilizó un clasificador duro, el algoritmo de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood). Luego, a la imagen clasificada se le aplicó un clasificador difuso, el algoritmo de convolución Fuzzy. Con esta operación de lógica difusa, a partir de la imagen clasificada y de la imagen de distancia, se creó una sola imagen temática. Las clases con un valor muy pequeño de distancia siguen apareciendo sin cambios y las que tiene valores altos de distancia pueden cambiar a un valor vecino si hay un suficiente número de píxeles vecinos con valores de la clase.

Como productos finales del procesamiento de las imágenes se obtuvieron tres mapas raster de usos/coberturas del suelo de la cuenca en estudio, los que se presentan en el Capítulo 6.

CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO

6.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN Y RED DE DRENAJE

Captura de la información de forma vectorial

Para la digitalización se utilizaron 10 cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM), a escala 1:100.000 (Tabla N° 6.1), las cuales debieron ser georeferenciadas al Sistema Internacional 1924 - Campo Inchauspe con proyección Gauss-Krüger - faja 5, en el que fueron elaboradas (año 1943).

Tabla N° 6.1: Cartas topográficas utilizadas (fuente: IGM)

		SAUCE 3160 - 6	DIAZ COLODRERO 3157-1
	ESTACION ESTACAS 3160-11	SAN JOSE DE FELICIANO 3160-12	ARRUABARRENA (SAN JAIME) 3157-7
LA PAZ 3160-16	SAN GUSTAVO 3160-17	VILLA FEDERAL 3160-18	
	SAUCE DE LUNA 3160-23	VILLA FEDERAL SUR 3160-24	

La equidistancia de las curvas de nivel es de 5m. Para la vectorización se utilizó el programa AutoCAD Map 2000. Se digitalizó cada carta en forma individual y luego se unieron las curvas de nivel como se muestra en la Figura N° 6.1.

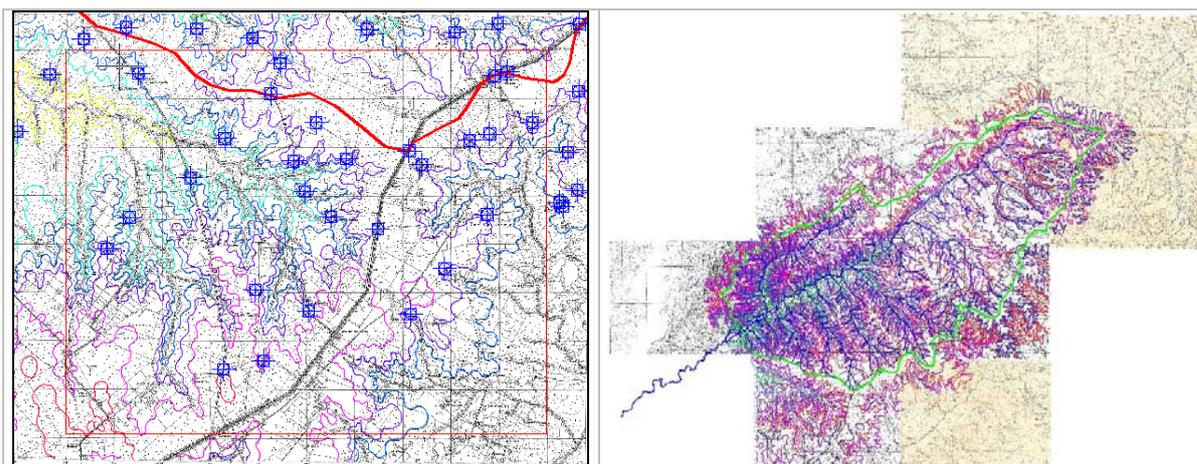


Figura N° 6.1: Digitalización de las curvas de nivel y puntos acotados a) Carta topográfica IGM georeferenciada, b) Unión de las cartas utilizadas

El sistema de proyección cartográfico adoptado en este trabajo es POSGAR 94, Sistema de Referencia Geocéntrico WGS84 (World Geodetic System 1984), con proyección

en Sistema de coordenadas Gauss-Krüger - faja 5. Por ello, se debió realizar el cambio del sistema de coordenadas de la información proveniente de las cartas digitalizadas.

Antes de comenzar la generación del MDE, el archivo resultante de la digitalización fue sometido a las siguientes operaciones y asignación de atributos:

- i) Transformación de los layer (format CAD) a shapefile (format ArcView).
- ii) Asignación de altitudes a las líneas y puntos acotados (nuevo atributo).
- iii) Cambio de Sistema de Proyección (de Campo Inchauspe a Posgar 94).
- iv) Unificación de la información, transformación de líneas a puntos.
- v) Unión de los puntos en un solo Shapefile.
- vi) Cálculo de las coordenadas (x, y) de los puntos (2 nuevos atributos).

El archivo generado con coordenadas (x, y, z) de todos los puntos fue utilizado como dato original para el proceso de interpolación (Figura N° 6.2). Los puntos acotados totalizaron 79.379.

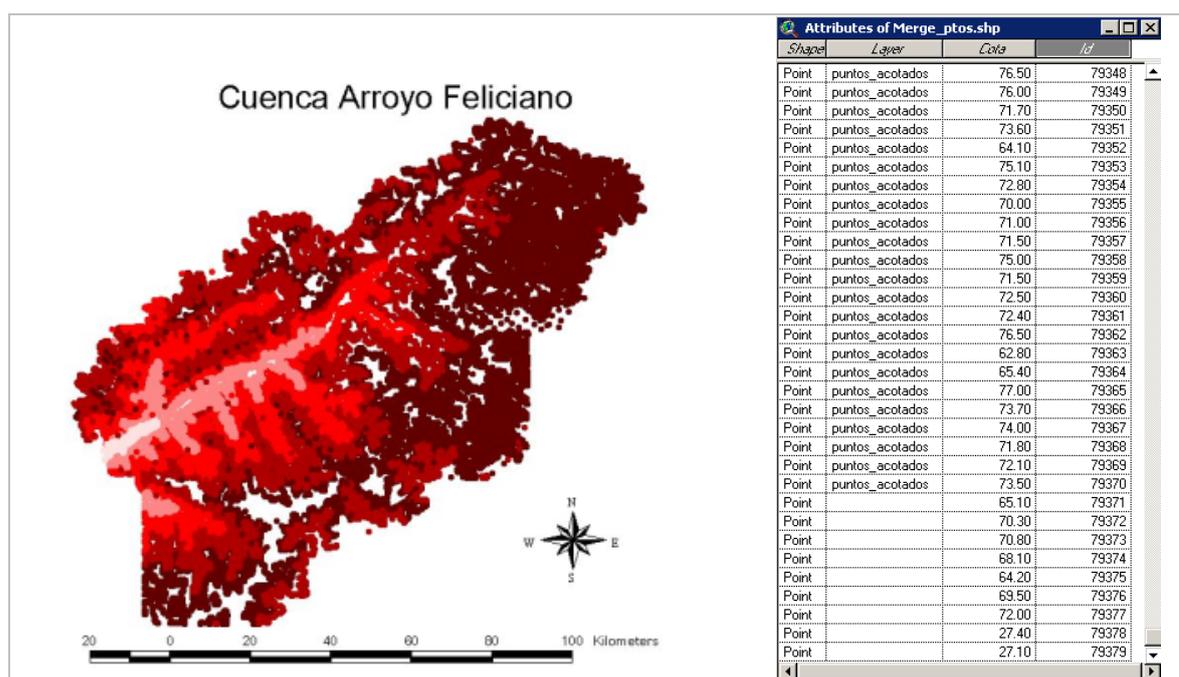


Figura N° 6.2: Resultado completo de la digitalización en formato de puntos

Interpolación

Para calcular el error de cada uno de los métodos de interpolación aplicados y así elegir el mejor método, se utilizó el software Surfer 8. Para esto, los datos nativos de ArcView GIS 3.2 fueron sometidos a una serie de transformaciones:

- i) Transformación del archivo de datos (x, y, z) a un archivo con extensión “*.txt”.
- ii) Transformación del archivo “*.txt” al formato del Surfer.

- iii) Cálculo de una grilla por interpolación de 30 m x 30 m. Aplicación de distintos métodos de interpolación.
- iv) Conversión de la grilla (*.grd) a archivo ASCIIxyz (*.dat).

La Figura N° 6.3 muestra el cuadro de diálogo para la preparación de la interpolación. Se especifican las columnas con los datos de las coordenadas (x, y, z), el método de interpolación con sus parámetros, el nombre del archivo de salida tipo grilla (*.grd) y el tamaño de las celdas (Spacing).

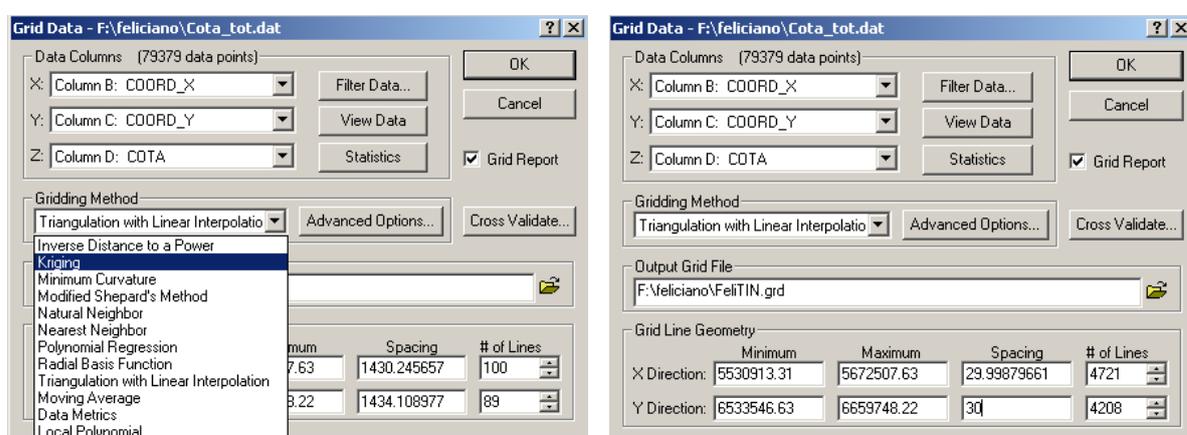


Figura N° 6.3: Cuadro de diálogo de Surfer 8 para la interpolación

Las imágenes obtenidas con los distintos métodos de interpolación se muestran en la Figura N° 6.4.

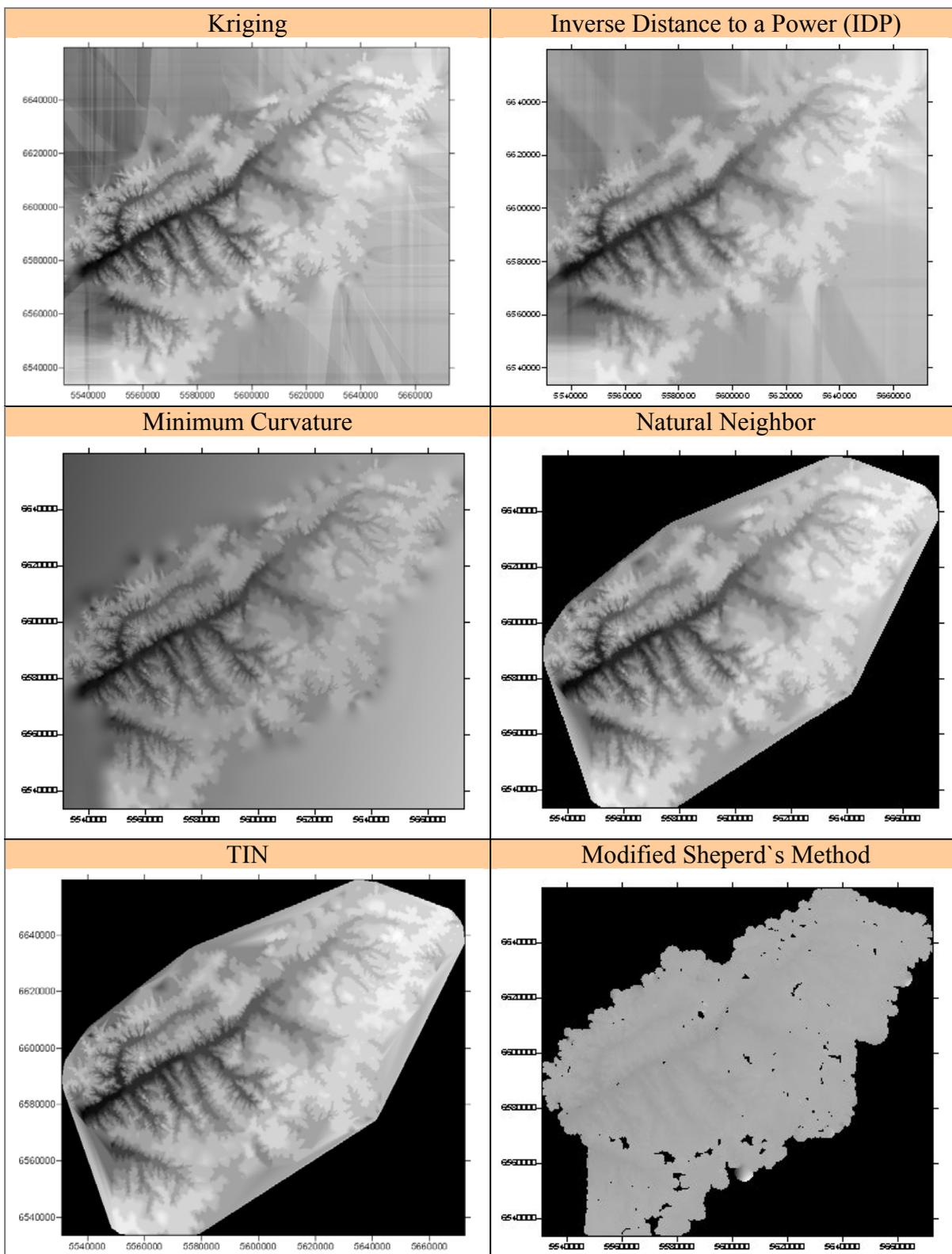


Figura N° 6.4: Visualización de las imágenes obtenidas con los métodos de interpolación

Errores de la interpolación

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla N° 6.2.

Tabla N° 6.2: Estadísticos de los errores de cada método de interpolación

Estadístico	KRIGING	IDP	Mínimum Curvature	Natural Neighbor	TIN
Cantidad de valores	79.379	79.379	79.379	79.324	79.337
Mínimo	-1,342	-1,665	-1,258	-1,696	-2,908
Máximo	1,535	1,520	1,980	1,919	2,228
Medio	-0,00022	0,000275	-0,00034	-0,00148	-0,0015
Desvío Standard	0,073	0,120	0,100	0,103	0,094

Puede observarse que el menor error medio se obtuvo con el método Kriging, por lo que se adoptó este método de interpolación.

Obtención del MDE en formato raster

Para generar el MDE raster se exportó la grilla creada en Surfer a ArcView, manteniendo activada la extensión Spatial Analyst. Las tareas realizadas fueron:

- i) Conversión del archivo *.dat a formato ASCII *.txt, en Surfer.
- ii) Importación del archivo ASCII (*.txt) y conversión a Shapefile (formato nativo de ArcView) en ArcView.
- iii) Conversión del Shapefile en una grilla (formato raster).
- iv) Construcción de una “máscara” en formato raster para delimitar el área de trabajo.

El MDE resultado se muestra en la Figura N° 6.5. Las cotas del terreno natural varían entre 26,7m y 78,5m.

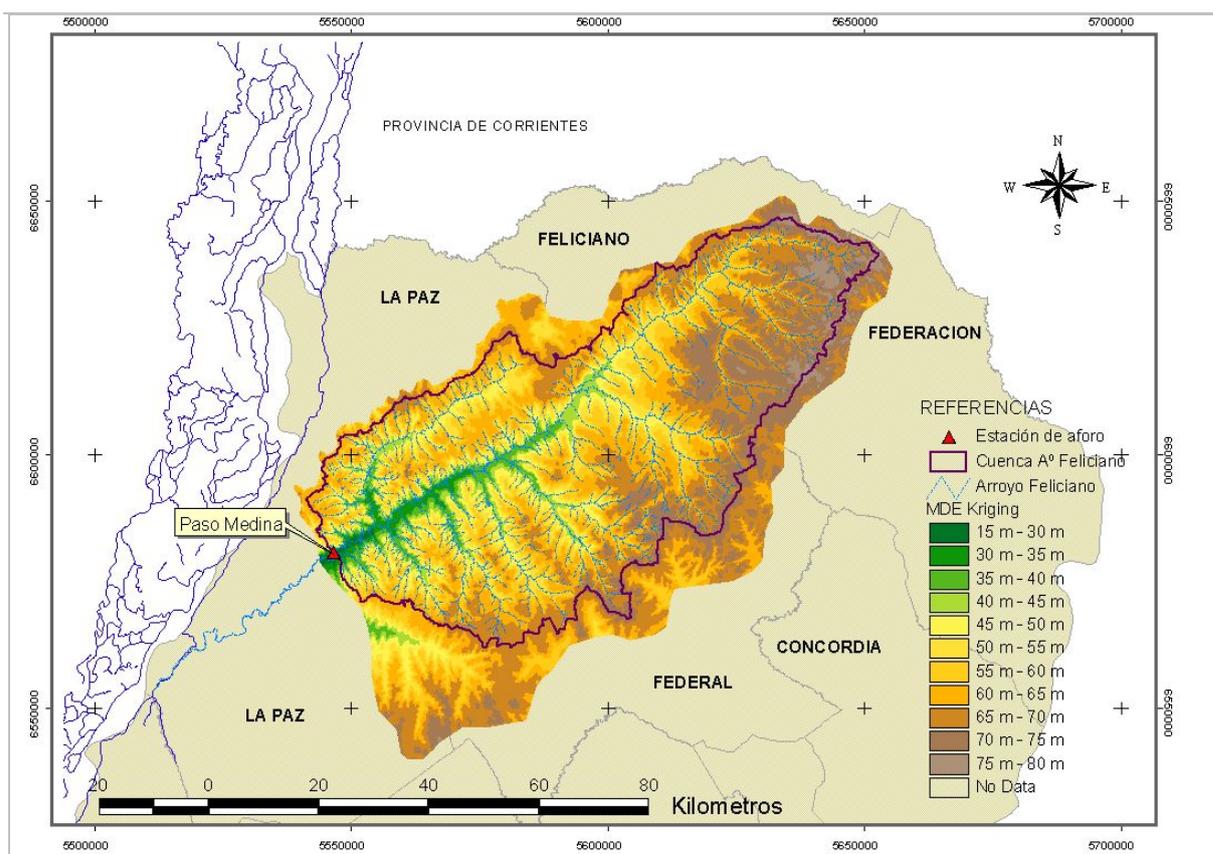


Figura N° 6.5: Mapa raster del Modelo Digital de Elevación

Se aplicó manualmente el procedimiento de “marcar a fuego los canales” a través de operaciones espaciales en ArcView GIS. A tal efecto, se creó una capa vectorial de la red de drenaje (ríos y arroyos) en formato Shapefile, tipo línea. Para esto, se combinó la siguiente información: a) una red de drenaje digitalizada sobre una imagen satelital georeferenciada de fecha 18/02/1994 (Figura N° 6.6), b) un mapa temático, en formato Shapefile, de la red de drenaje de la Provincia de Entre Ríos (fuente: DPHER). Con la creación de la capa vectorial se aseguró que las líneas de los ríos y arroyos estén correctamente unidas y representen adecuadamente la realidad.

Dado que la red de drenaje es requerida por AGWA en formato raster, se definió un área de proximidad (polígono Buffer) de 30 m contiguo a los ríos a partir de la red de drenaje de líneas, luego se transformó en formato raster, resultando un mapa booleano donde el valor 1 correspondía a las celdas de los ríos y el valor 0 para el resto. Luego se realizó una operación espacial entre el Buffer y el MDE que permitió obtener otro mapa donde las cotas de los ríos quedaron con su valor original.

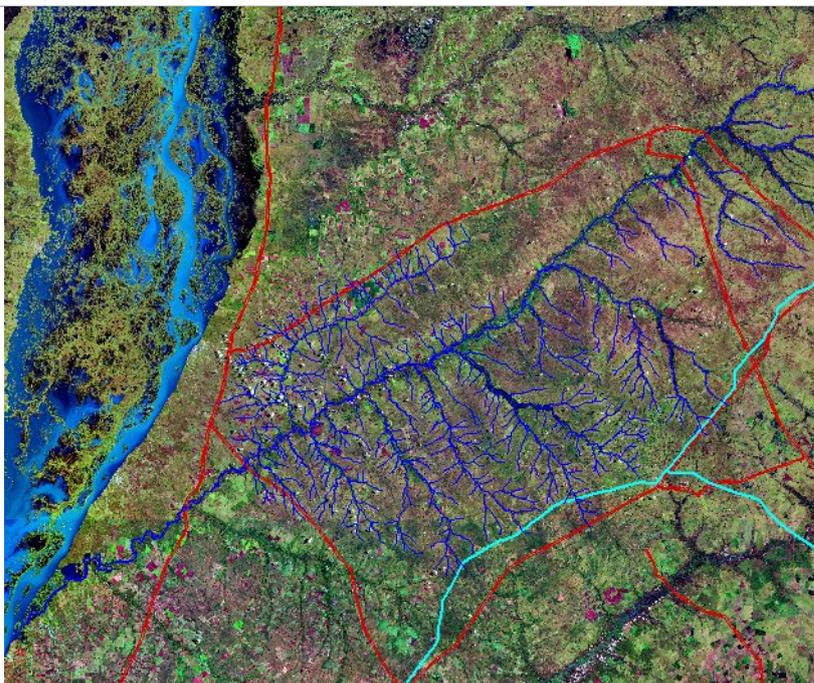


Figura N° 6.6: Digitalización del A° Feliciano sobre la imagen digital

Obtención de los mapas de flujo acumulado y dirección de flujo

Los mapas raster de *dirección de flujo* y *flujo acumulado* obtenidos para la cuenca en estudio se muestran en la Figura N° 6.7 y Figura N° 6.8, respectivamente.

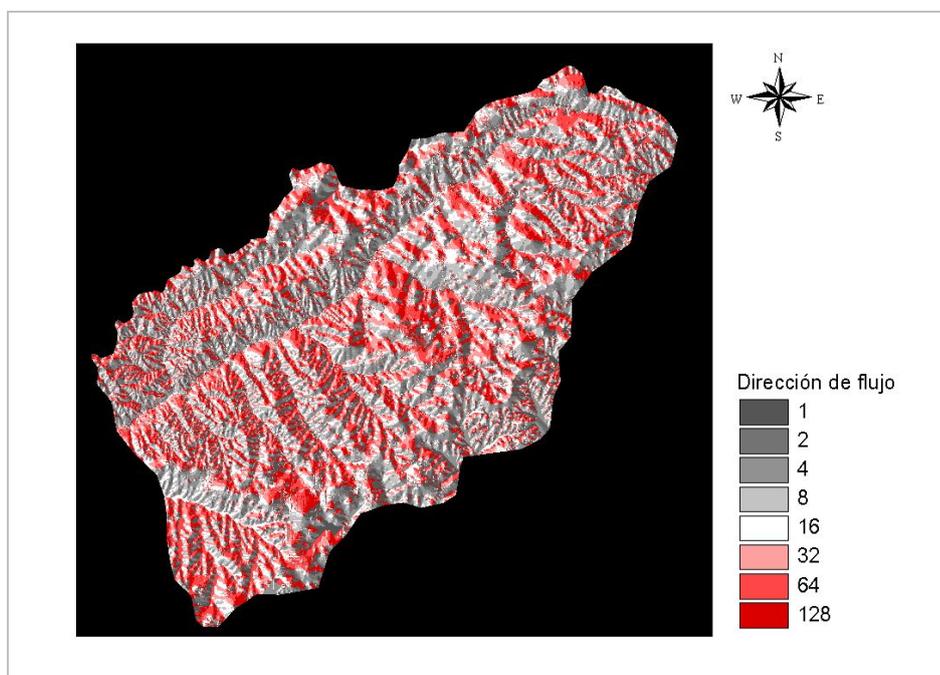


Figura N° 6.7: Mapa raster de dirección de flujo

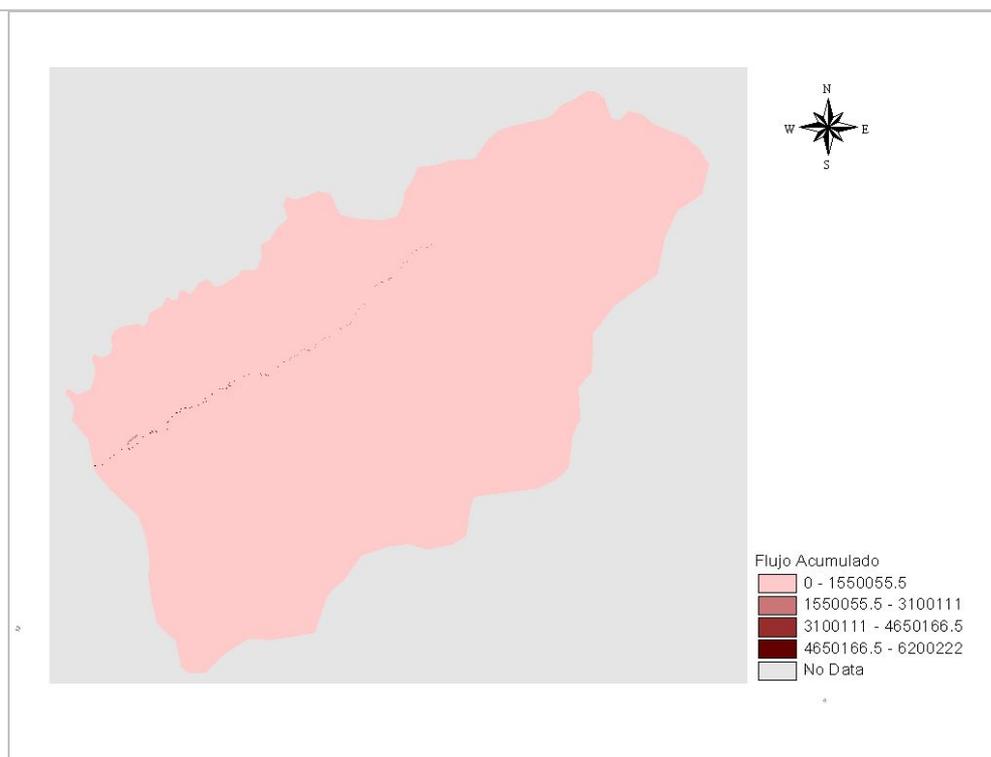


Figura N° 6.8: Mapa raster de flujo acumulado

6.2. MAPA DE SUELOS

El mapa de suelos de la cuenca en estudio con la clasificación FAO fue elaborado específicamente para esta Tesis por la MSc. Ing. Mabel Pazos, docente e investigadora de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires, quien ha participado en la elaboración del WRB.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla N° 6.3 y Figura N° 6.9. Una descripción detallada de la equiparación entre las clasificaciones se presenta en el Anexo VI.

Tabla N° 6.3: Atributos de la tabla del mapa de suelo de la cuenca en estudio con la clasificación FAO

ID	Simbología INTA	SNUM	Simbología FAO	ID	Simbología INTA	SNUM	Simbología FAO
1	AFtc-2	6703	Lg3	8	MIve-7	5751	H13
2	AFve-1	6703	Lg3	9	MJfv-2	4722	Hh2
3	AFve-3	6703	Lg3	10	VBag-1	283	Vp3
4	ECTc-2	1661	Re2	11	VBay-1	283	Vp3
5	ICTc-1	5743	Ge3	12	VBay-2	283	Vp3
6	MCve-1	3946	Hg3	13	VBaz-1	283	Vp3
7	MIac-12	5749	H12				

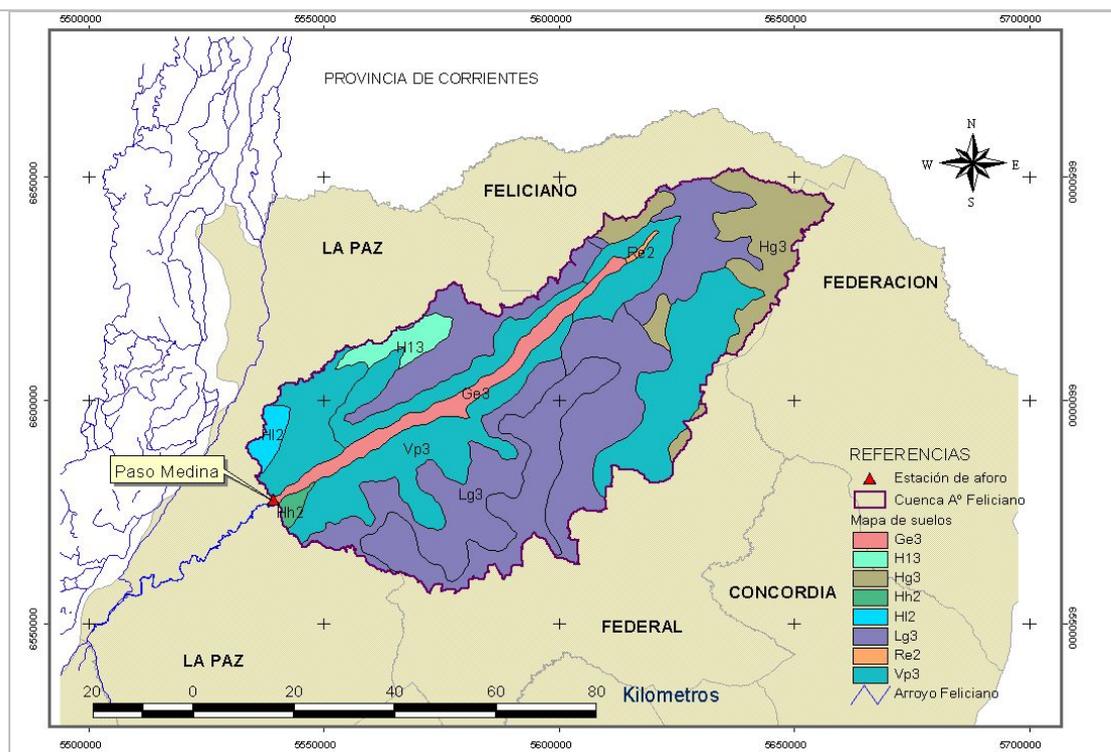


Figura N° 6.9: Mapa de suelos con la clasificación FAO

En la tabla FAO_World se presentan casi 5000 tipos de suelos, de acuerdo a la composición de cada uno (unidad de suelo – porcentaje). En la cuenca en estudio sólo se dispone de información de una unidad de suelo y una capa, a la que se le asigna el 100%.

Se identificaron en las tablas los valores SNUM correspondientes a los 8 suelos presentes. En los casos de suelos que no existían en la tabla original, se los agregó especialmente para este trabajo, generando una nueva tabla con el mismo nombre.

6.3. MAPAS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO

La escena PATH 226 ROW 81 cubre la totalidad la cuenca en estudio. Se seleccionaron las fechas 11/01/1986, 30/03/1997 y 24/04/2006, como representativas de los escenarios de usos/coberturas del suelo de los años 1986, 1997 y 2006, respectivamente. Las dos primeras fueron suministradas por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil, que ya vienen con una georeferenciación, aunque distinta a la utilizada en este trabajo. La tercera fue suministrada por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina.

Se describen a continuación las tareas de pre-procesamiento y clasificación supervisada realizadas para obtener el mapa de uso de suelo en formato raster.

Pre-procesamiento

Corrección radiométrica y atmosférica

Con el modelo COST de Idrisi Kilimanjaro se realizó primero el procedimiento llamado “calibración” y luego, la corrección atmosférica. El resultando es una imagen con valores reales (32 bits) de reflectancia que varían entre 0 y 1. Los valores de los parámetros utilizados se presentan en las tablas del Anexo VII.

Para llevar la imagen de 32 bits a 8 bits (ocupa menos memoria) se reescaló cada valor de reflectancia multiplicando por 255.

Corrección geométrica

Para esto, se partió de una imagen georeferenciada suministrada por la Ing. Agr. Griselda Carñel (Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos) de fecha 02/04/2001 y se realizó la georeferenciación o remuestreo de las imágenes de trabajo corregidas.

Para ubicar los puntos de control se recurrió a las rutas y vías del ferrocarril en formato Shapefile, superponiéndolas con la imagen georeferenciada como ayuda.

Para la imagen del año 2006 se identificaron 70 puntos de control distribuidos en toda la imagen, verificando que el error de la georeferenciación (RMS) sea menor a 0.5 píxel.

En el caso de las imágenes de 1986 y 1997 como tienen una georeferenciación previa (SAD69 WGS84 UTM) distinta a la del trabajo (Posgar 94- GK faja5), se realizó el remuestreo utilizando 10 puntos de control, verificando también el error menor a 0.5 píxel.

La interpolación espacial se realizó aplicando una función lineal y la interpolación radiométrica por el método del vecino más próximo (“Nearest neighbor”).

Ventana de trabajo

Los límites de la ventana adoptados se muestran en la Tabla N° 6.4.

Tabla N° 6.4: Coordenadas de los vértices de la ventana de trabajo

Vértice superior Izquierdo	Vértice inferior derecho
ULX : 5.530.000	LRX : 5.674.990
ULY : 6.660.000	LRY : 6.546.990

Clasificación Supervisada

Definición de las categorías o clases

Tomando como antecedentes el “Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos” (SAyDS, 2006) y el trabajo “Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos” (Muñoz et al. 2003) (Anexo VIII), se definieron nueve (9) clases de uso del suelo.

Las imágenes satelitales disponibles con resolución de 30 m permiten distinguir dos tipos de cultivos. Teniendo en cuenta este aspecto y dados los objetivos de esta Tesis, se definieron las clases de uso/cobertura del suelo que se listan en la Tabla N° 6.5.

Tabla N° 6.5: Clases de uso/cobertura del suelo

N°	Clases de uso/cobertura del suelo	Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos	Bosques Nativos y Selvas Ribereñas
1	Bosque	Plantaciones forestales + Bosque en galería + Vegetación herbácea hidrófila	Bosque natural cerrado + Vegetación ribereña
2	Monte	Bosque de Ñandubay + Ñandubay tipo parque + Arbustales	Bosque natural abierto
3	Cultivos 1	Cultivos	
4	Cultivos 2	Cultivos	
5	Pasturas	Pastizales	
6	Barbecho		
7	Suelo desnudo	Sin vegetación	
8	Agua	Cuerpos de agua	
9	Suelo quemado		

Creación de los sitios de entrenamiento y firmas espectrales

Para cada clase se seleccionaron entre 20 y 30 áreas de interés, luego con el editor de firma (“Signatura Editor”) se creó la firma espectral promedio, que son paramétricas porque ellas tienen información estadística. Se generó así un archivo de sitios de entrenamiento “*.aoi” y una firma espectral “*.sig”, para cada fecha e imagen.

En la Figura N° 6.10 se muestran las firmas espectrales de las clases identificadas para la imagen del 2006. Se puede observar que la mayor separabilidad ocurre entre las bandas 4, 5 y 7 (en la figura aparece como 6).

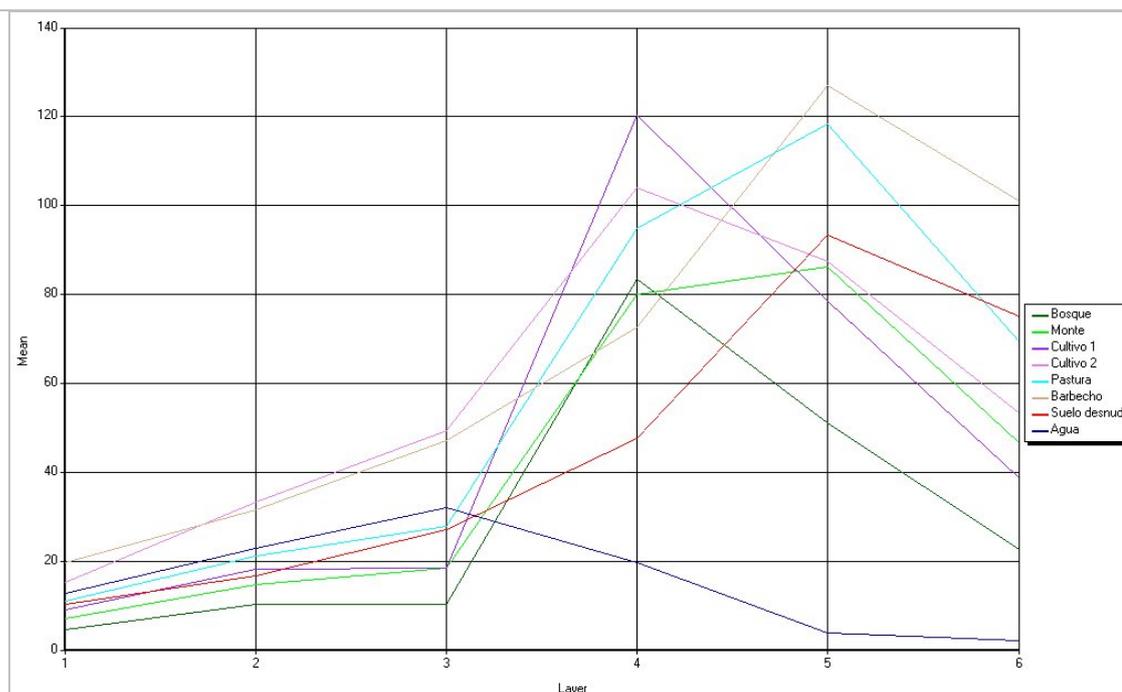


Figura N° 6.10: Firmas espectrales de las clases identificadas para la imagen del 2006

Se seleccionaron todas las bandas para calcular los estadísticos de las distintas clases. Las clases Cultivo 1, Cultivo 2 y Monte tienen un valor máximo en la banda 4 y las clases barbecho, pastura, suelo desnudo y suelo quemado en la banda 5.

En ninguna de las 3 imágenes analizadas se identificaron todas las clases. Por ejemplo, en la imagen de enero/1986 no se detectó “Barbecho” (por eso se agrupó la clase “pastura + barbecho”) y en marzo/1997 y abril/2006 no se detectó “Suelo Quemado”.

Fase de Asignación

A modo ilustrativo, en las Figuras N° 6.11 y N° 6.12 se muestran la imagen original y la clasificada, respectivamente, de abril de 2006.

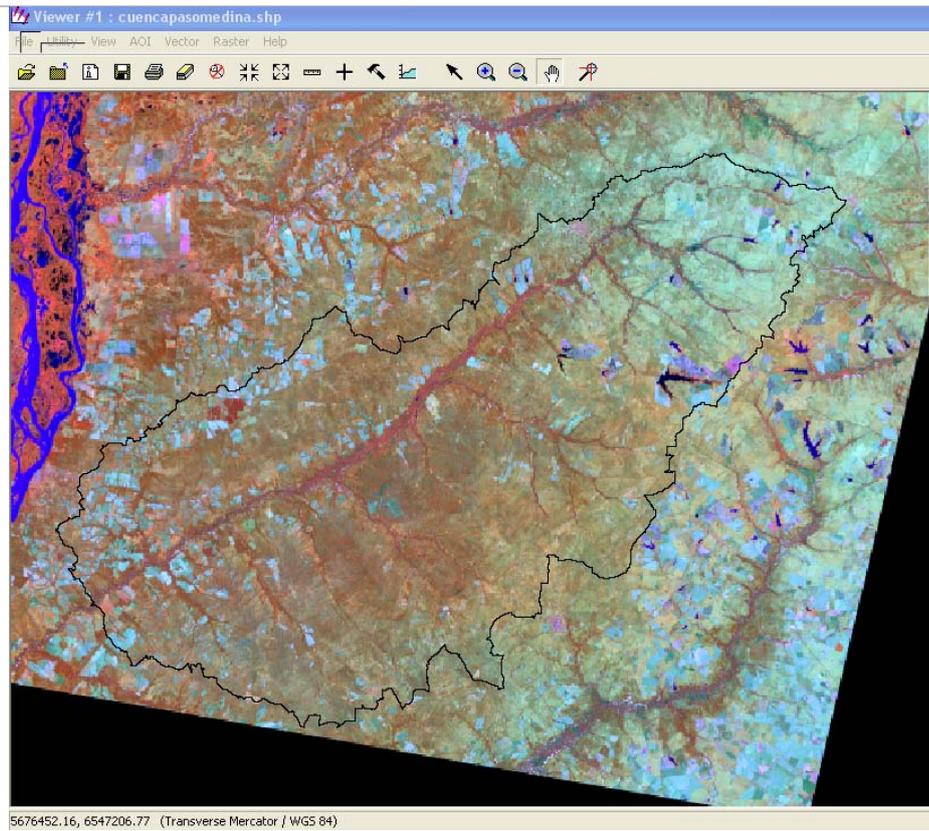


Figura N° 6.11: Imagen Falso Color Mejorado RGB 453 de Abril/2006

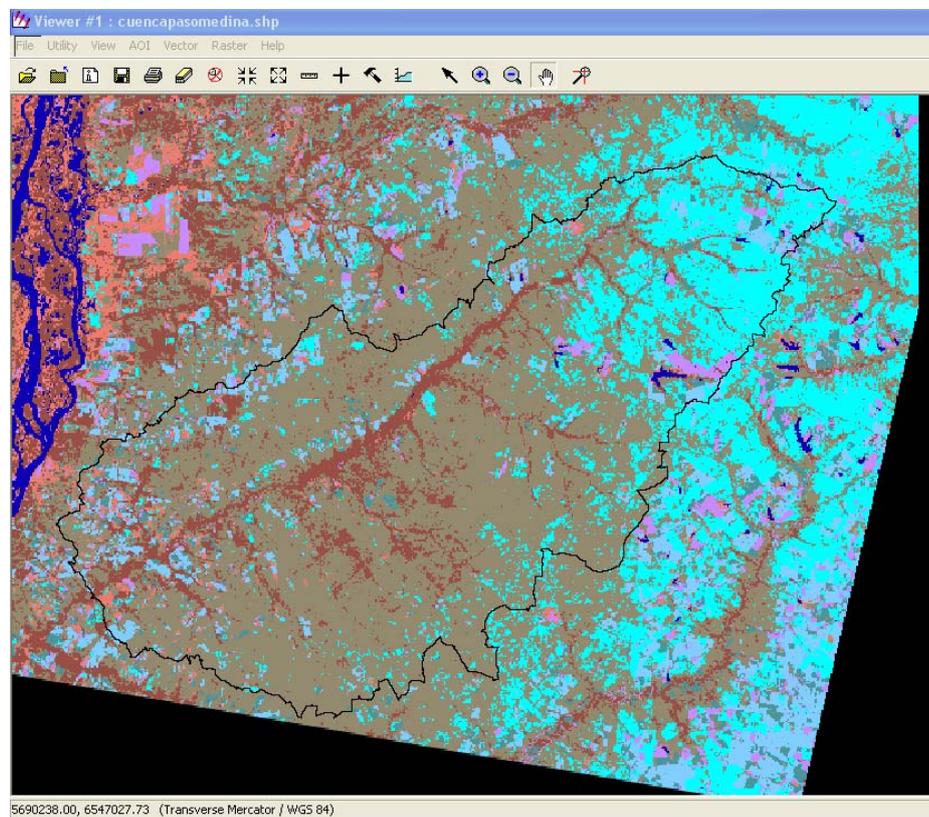


Figura N° 6.12: Imagen clasificada con 8 clases de Abril/2006

Fase de Verificación

Para verificar la bondad de la clasificación se calculó la Matriz de Contingencia para cada imagen, siendo aceptables los resultados obtenidos.

En las matrices de contingencia (Anexo IX) se puede ver que las mayores confusiones se dan entre las clases Bosque y Monte Nativo. Esta situación también se planteó en la identificación del Inventario Nacional de Bosques, de igual manera que entre las clases Pastura y Monte, cuando la uso arbóreo del suelo es pobre.

Como productos finales de este procedimiento se obtuvieron 3 mapas raster de usos/coberturas del suelo, uno para cada escenario, que contienen los campos value y count. Los valores de la columna “value” son enteros y se asocian con el campo “class” de la tabla nacl_lut.dbf.

La Figura N° 6.13 muestra el mapa de usos/coberturas del suelo para el evento de abril de 1986, obtenido a partir de la imagen satelital de fecha 11/01/1986. Las superficies obtenidas para cada clase se muestran en la Tabla N° 6.6.

Tabla N° 6.6: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 11/01/1986

N°	Clase	Superficie		
		Parcial (has)	Acumulada (has)	Acumulada (%)
1	Bosque	42.101		
2	Monte	401.354	443.455	80,0
3	Cultivo 1	5.206		
4	Cultivo 2	20	5.226	0,9
5	Pastura	81.328	81.328	14,7
6	Barbecho	0	0	0,0
7	Suelo Desnudo	19.812	19.812	3,6
8	Agua	54	54	0,0
9	Suelo Quemado	4.301	4.301	0,8

Dada la época del año, no se pudo identificar la clase “Barbecho” pero sí grandes superficies de “Suelo Quemado”, como puede observarse en la tabla.

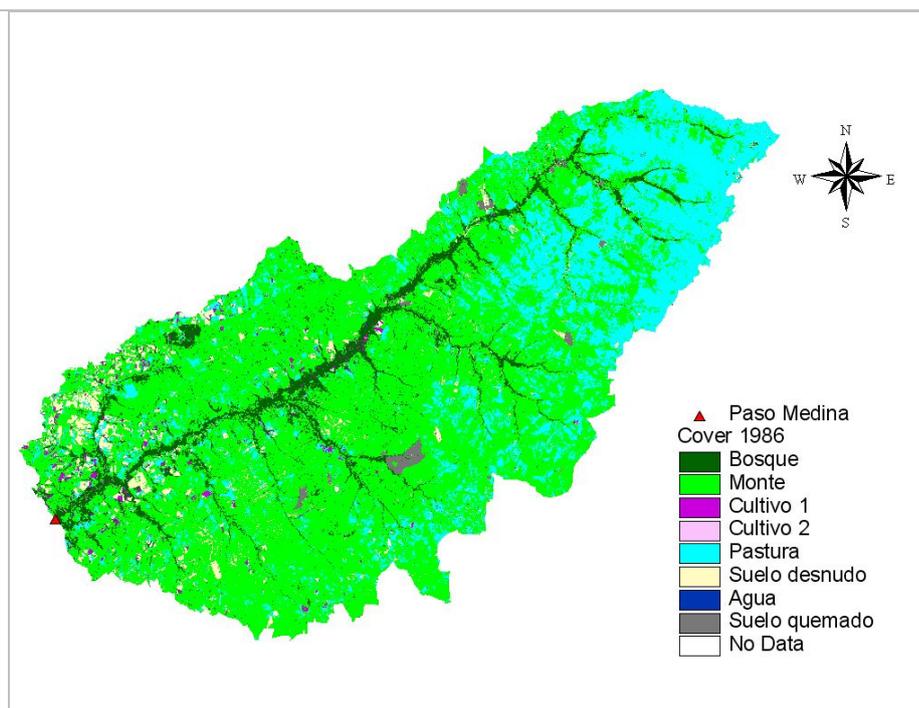


Figura N° 6.13: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 1986

La Figura N° 6.14 muestra el mapa de cobertura para el evento de abril de 1996, obtenido a partir de la imagen satelital de fecha 30/04/1997. Las superficies obtenidas para cada clase se muestran en la Tabla N° 6.7.

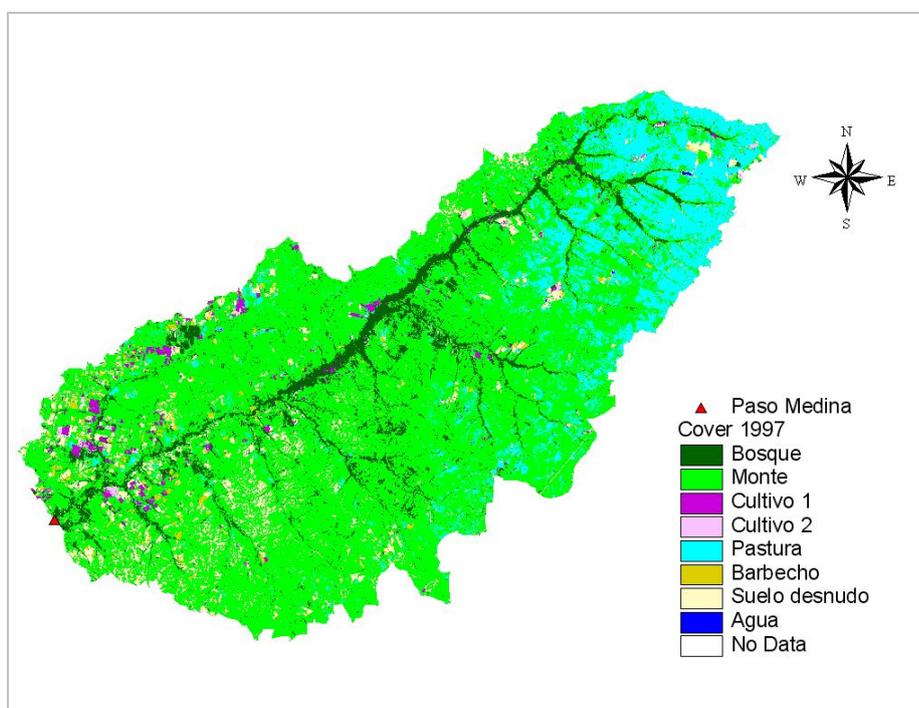


Figura N° 6.14: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 1997

Tabla N° 6.7: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 30/04/1997

N°	Clase	Superficie		
		Parcial (has)	Acumulada (has)	Acumulada (%)
1	Bosque	47.871		
2	Monte	385.105	432.976	78,14
3	Cultivo 1	8.039		
4	Cultivo 2	2.720	10.759	1,94
5	Pastura	73.295	73.295	13,23
6	Barbecho	5.042	5.042	0,91
7	Suelo Desnudo	31.878	31.878	5,75
8	Agua	173	173	0,03
9	Suelo Quemado	0	0	0,00

Se puede observar que la clase “Suelo Quemado” no se pudo identificar en esta ocasión.

La Figura N° 6.15 muestra el mapa de cobertura para el evento de febrero de 2005, obtenido a partir de la imagen satelital de fecha 24/04/2006. Las superficies obtenidas para cada clase se muestran en la Tabla N° 6.8.

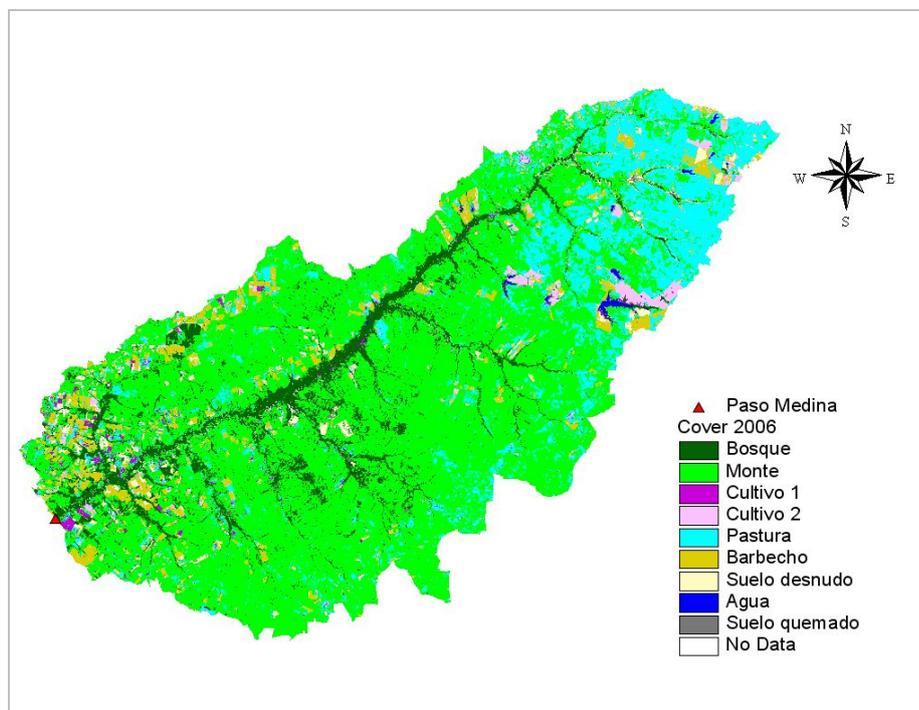


Figura N° 6.15: mapa de usos/coberturas del suelo del escenario 2006

Tabla N° 6.8: Superficies de usos/coberturas identificadas en la imagen 24/04/2006

N°	Clase	Superficie		
		Parcial (has)	Acumulada (has)	Acumulada (%)
1	Bosque	51.523		
2	Monte	355.889	407.413	73,52
3	Cultivo 1	5.455		
4	Cultivo 2	15.576	21.031	3,80
5	Pastura	87.174	87.174	15,73
6	Barbecho	25.944	25.944	4,68
7	Suelo Desnudo	10.415	10.415	1,88
8	Agua	1.246	1.246	0,22
9	Suelo Quemado	899	899	0,16

6.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO

Se implementó el modelo a la cuenca en estudio para distintos escenarios de usos/coberturas del suelo (1986, 1997 y 2006) a partir del MDE, del mapa de suelos y de los mapas de usos/coberturas del suelo previamente elaborados. Se describen a continuación las tareas realizadas para la implementación.

Delineación de la cuenca (“Delineate Watershed”)

Se analizaron distintos valores del parámetro CSA y se adoptó el valor de 12.000 has, lo que da un total de 63 subcuencas (planos de escurrimiento) y 25 segmentos de canal. El mapa de subcuencas obtenido se muestra en la Figura N° 6.16.

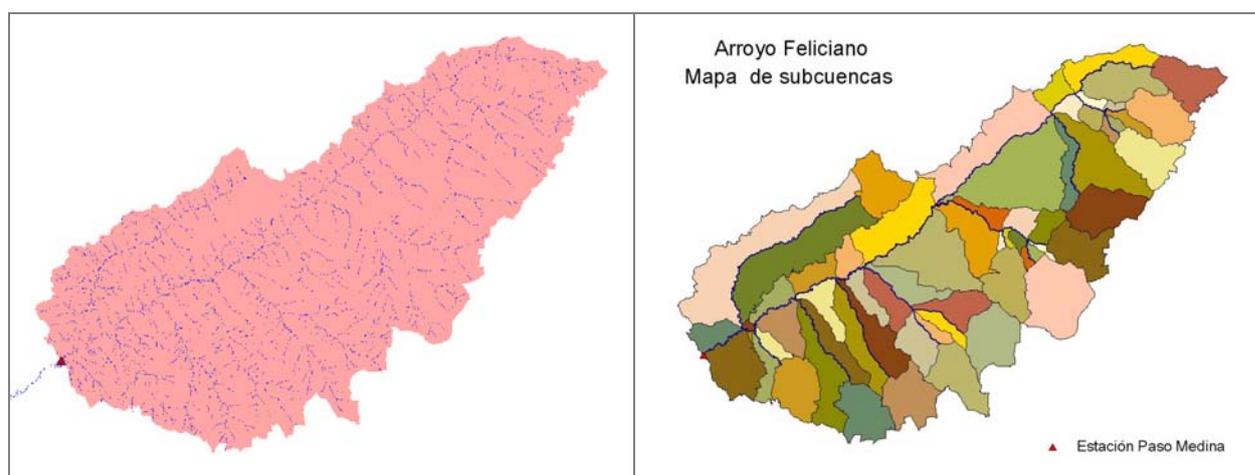


Figura N° 6.16: Límites de cuenca y subcuencas generados por AGWA-KINEROS

Este nivel de desagregación espacial obtenido se consideró suficiente para describir adecuadamente la distribución espacial de la lluvia y de la esorrentía. Los límites de las

subcuencas obtenidos automáticamente resultaron muy similares a los determinados en forma manual en un estudio antecedente sobre la misma cuenca (Morin et al., 1989).

En la Tabla N° 6.9 se pueden ver los valores de algunos parámetros de las subcuencas.

Tabla N° 6.9: Parámetros calculados en el shapefile cuenca

CSA (has)	Cantidad de subcuencas	Pendiente media (%)	Cota media (m)	Ancho mínimo (m)
12000	63	0,48	57,7	598,9

En base a aforos y a la interpretación de imágenes satelitales de la cuenca, se determinaron los anchos y profundidades para distintas secciones de control y se ajustaron las expresiones (5.23) y (5.24) para la cuenca en estudio.

$$B = 15.0 A^{0.2} \quad (6.1)$$

$$H = 0.0502 A^{0.152} \quad (6.2)$$

B: ancho del canal (m) A: superficie de aporte hasta la sección (m²), H: profundidad del canal (m).

Se modificaron los valores por defecto de parámetros de los segmentos de canal, asignándole los correspondientes a suelos con alto contenido de arcilla y una rugosidad representativa de un valle de inundación con cobertura forestal densa. Esto último es debido a que AGWA sólo permite considerar secciones transversales simples (no compuestas) para representar los canales y dado que los caudales máximos de las crecidas simuladas exceden el cauce principal y se conducen principalmente por el valle aluvial (Tabla N° 6.10).

Tabla N° 6.10: Parámetros modificados en el shapefile del canal.

Parámetro	Valor por defecto	Valor modificado
MAN	0,035	0,10
CV	0	1
KSAT	210	0,6
G	101	407
DIST	0,545	0,340
POR	0,440	0,475
PCT_CLAY	0,05	0,50
PCT_SILT	0,05	0,27
PCT_SAND	0,90	0,23
COH	0,005	0,007

Parametrización de suelos y de usos/coberturas del suelo (“Run Land Cover and Soils Parameterization”)

Los valores de los parámetros de los segmentos asociados al tipo de suelo se obtuvieron a partir del mapa de suelos (polígonos) en formato shapefile, donde cada polígono corresponde a una unidad de suelo según la clasificación FAO.

Los valores de los parámetros asociados a los usos/coberturas del suelo para cada uno de los escenarios seleccionados (1986, 1997 y 2006) se obtuvieron a partir de los mapas raster de usos/coberturas del suelo correspondientes.

Se modificó la tabla `nalc_lut.dbf` original para describir los usos/coberturas del suelo según la clasificación definida para este trabajo. A la tabla obtenida se la denominó `nalc_Feliciano` (Tabla N° 6.11).

Tabla N° 6.11: Valores de la tabla `Nalc_feliciano`

CLASS	NAME	COVER	INT	N	IMPERV
1	Bosque	35	1,15	0,200	0,00
2	Monte Nativo	30	1,15	0,150	0,00
3	Cultivo 1	50	2,80	0,040	0,00
4	Cultivo 2	50	2,80	0,040	0,00
5	Pastura	25	2,00	0,150	0,00
6	Barbecho	20	0,30	0,035	0,00
7	Suelo desnudo	0	0,00	0,025	0,00
8	Agua	0	0,00	0,000	0,00
9	Suelo quemado	0	0,00	0,025	0,00

COVER: porcentaje de uso del suelo (%), INT: profundidad de intercepción en (mm), N: coeficiente de rugosidad de Manning para flujo superficial, IMPERV: porcentaje de superficie impermeable.

En el Anexo X se puede observar la tabla de atributos de los dos Shapefile creados, la delimitación de subcuencas “`Wfe12.shp`” y ríos “`Sfe12.shp`”.

Intervalo de tiempo computacional

Se determinó el tiempo de equilibrio para la subcuenca con menor valor de longitud. De la delimitación y parametrización realizada se obtuvieron los siguientes datos para la subcuenca 243: Longitud = 600,3 m, Pendiente = 0,0045 m/m, Coeficiente de rugosidad = 0,128 e Intensidad de lluvia = 200 mm/360 min = 9,26 10^{-6} m/seg.

A partir de estos datos se aplicó (5.25) y se obtuvo $t_e = 7057$ seg = 117,6 min

Finalmente, aplicando (5.26), se adoptó un valor de Δt de 15 min.

CAPÍTULO 7: CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA DISTINTOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO

Se calibró el modelo para cada uno de los escenarios de usos/cobertura del suelo considerados (1986, 1997 y 2006). Para ello, se seleccionaron tres eventos precipitación-escorrentía observados en la cuenca en estudio, cada uno ocurrido durante uno de los tres escenarios mencionados.

Los eventos seleccionados corresponden a las crecidas de abril de 1986, abril de 1996 y febrero de 2005. Para cada evento se contó con datos de caudales diarios del A° Feliciano en Paso Medina (fuente: SSRH) y de precipitaciones diarias en 23 estaciones con peso en la cuenca (fuente: DPHR).

Los eventos tuvieron alturas de lluvia similares, duraciones de lluvia de entre 2 y 4 días e hidrogramas observados de pico único. Para cada uno de ellos se calculó la precipitación media areal para la cuenca total, aplicando el método de los polígonos de Thiessen con ArcView y se determinaron las isohietas de lluvia total, aplicando el método de interpolación de Kriging con el programa Surfer 8. También se calculó el escurrimiento directo, a partir del hidrograma observado, aplicando el método de la pendiente variable para la separación del flujo base. Los parámetros de los eventos seleccionados se muestran en la Tabla N° 7.1.

Tabla N° 7.1: Parámetros de los eventos estudiados

Evento	Lluvia media (mm)	Caudal máx. (*) (m³/seg)	Tiempo máx. (h)	Escurrimiento directo (hm³)	Escurrimiento directo (mm)	C
Abril-1986	176,9	704	72	325	58,7	0,33
Abril-1996	142,4	798	96	367	66,2	0,46
Febrero-2005	174,2	846	96	500	90,3	0,52

(*) Máximo del hidrograma de escurrimiento directo, C: coeficiente de escorrentía.

A partir de la información precipitación-escorrentía observada, se calibró el modelo por un proceso de prueba y error, hasta obtener la mejor correspondencia entre los hidrogramas simulados con los correspondientes observados en Paso Medina. Esta tarea no fue sencilla, dada a la gran cantidad de parámetros de este modelo.

Con el objeto de auxiliar la calibración, se calcularon los estadísticos coeficiente de eficiencia, E_f (Nash y Sutcliffe, 1971), error estándar, E_e y errores relativos del caudal máximo, E_{rQ_M} y volumen escurrido, E_{rV} :

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^c)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - \overline{Q^o})^2} \quad (7.1)$$

$$E_e = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^o - Q_t^c)^2}{n}} \quad (7.2)$$

$$E_{rQ_M} = \frac{Q_M^c - Q_M^o}{Q_M^o} 100 \quad (7.3)$$

$$E_{rV} = \frac{V^c - V^o}{V^o} 100 \quad (7.4)$$

Q_t^o y Q_t^c : caudales observado y calculado al tiempo t , $\overline{Q^o}$: caudal observado medio, n : número de intervalos de tiempo, Q_M^o y Q_M^c : caudales máximos observado y calculado, V^o y V^c : volúmenes de escurrimiento observado y calculado.

Una calibración es satisfactoria cuando E_f se aproxima a la unidad y E_e es suficientemente pequeño respecto al caudal medio observado. Para esta Tesis, se adoptaron los parámetros de calibración que maximizaron el coeficiente E_f y para los cuales los errores relativos del caudal máximo y del volumen escurrido, en valor absoluto, fueron simultáneamente menores o iguales al 20%.

7.1. EVENTO DE ABRIL DE 1986

La tormenta se desarrolló entre los días 24 y 25 de abril de 1986, con una lluvia total areal de 176,9 mm. La precipitación caída en los 30 días antecedentes fue de 156 mm. La Tabla N° 7.2 muestra los datos de lluvia del evento en las distintas estaciones.

Tabla N° 7.2: Datos de lluvia del evento de abril de 1986

N°	Estación	Precipitación (mm)		Total (mm)
		24-abr-86	25-abr-86	
1	Banderas	175	46	221
2	Colonia N°3	109	104	213
3	Cto Bernardi	105	27	153
4	El Carmen	152	48	200
5	El Cimarrón	117	33	150
6	Esperanza	112	35	147

N°	Estación	Precipitación (mm)		Total (mm)
		24-abr-86	25-abr-86	
7	Estacas	94	100	194
8	Federal	114	22	136
9	Feliciano	122	60	182
10	La Esmeralda	90	44	134
11	La Paz	147	30	177
12	Los Conquistadores	89	55	144
13	San Gustavo	178	52	230
14	San Jaime	99	30	129

La Figura N° 7.1 muestra los polígonos de Thiessen obtenidos con ArcView para el cálculo de la precipitación total areal del evento.



Figura N° 7.1: Polígonos de Thiessen para el evento de abril de 1986

La Figura N° 7.2 muestra el mapa de isohietas de lluvia total del evento.

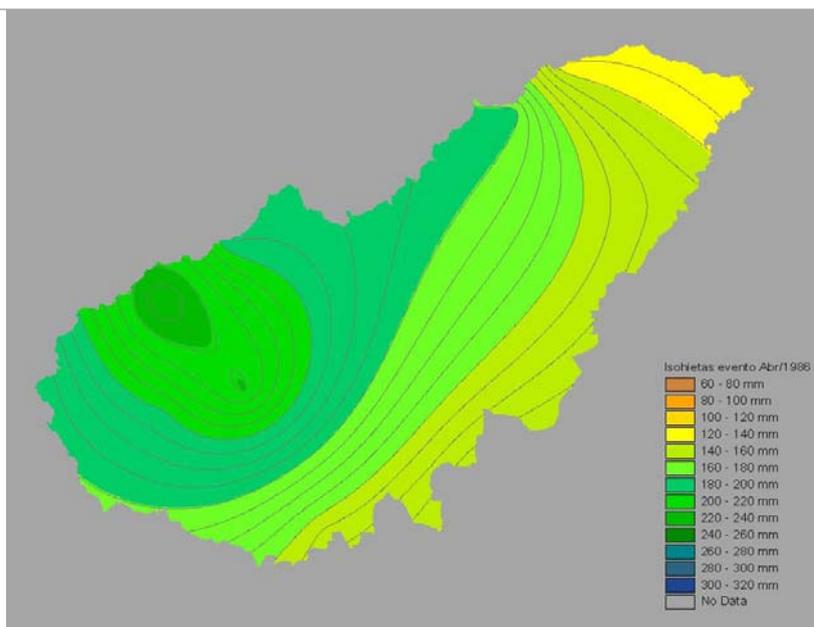


Figura N° 7.2: Mapa de isohietas de lluvia total del evento de abril de 1986

Se observa que las mayores precipitaciones se produjeron sobre la cuenca baja del A° Feliciano, con el núcleo sobre la subcuenca del A° Estacas.

La calibración obtenida resultó satisfactoria. El coeficiente de eficiencia fue de 0,89 y el error estándar de 76,5 m³/seg, con un caudal medio observado de 221,3 m³/seg. Los errores relativos fueron: del caudal máximo, -4% y del volumen de escurrimiento, 3%. La Figura N° 7.3 muestra los hidrogramas observado y simulado.

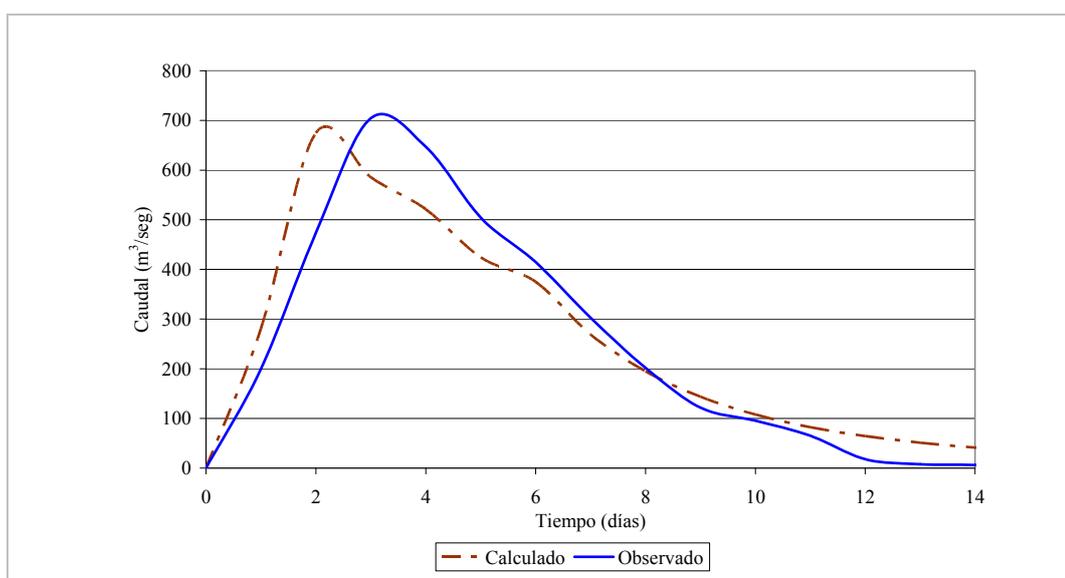


Figura N° 7.3: Hidrogramas observado y simulado del evento de abril de 1986

En la Tabla N° 7.3 se listan los parámetros del modelo, los multiplicadores aplicados, el origen de los valores de los parámetros, la variabilidad espacial de los mismos y los valores mínimo, medio y máximo obtenidos.

Tabla N° 7.3: Parámetros de calibración del evento de abril de 1986

Parámetro	Mult.	Origen	Variabilidad	Valores		
				Mínimo	Medio	Máximo
INT	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,92	1,29	1,80
COVER	1	Uso/Cobertura	Distribuido	23,10	28,47	30,85
MANN_N	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,114	0,149	0,171
PCT_IMPERV	---	Uso/Cobertura	Distribuido	0	0	0
PAVE	1	Tipo de suelo	Distribuido	0	0	0
SPLASH	1	Tipo de suelo	Distribuido	114,1	123,9	131,7
ROCK	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,05	0,06	0,15
KS	1	Tipo de suelo	Distribuido	0,53	1,93	3,93
G	1	Tipo de suelo	Distribuido	259	325	407
POR	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,462	0,469	0,478
SMAX	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,80	0,83	0,84
CV	1	Tipo de suelo	Distribuido	0,48	0,73	0,94
PCT_SAND	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,13	0,32	0,4
PCT_SILT	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,12	0,19	0,29
PCT_CLAY	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,40	0,49	0,63
DIST	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,16	0,20	0,24
COHESION	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,0007	0,0008	0,0008
SA	---	Usuario	Concentrado	----	0,40	----
n CANAL	1,4	Usuario	Concentrado	----	0,14	----
B CANAL	1	Usuario	Distribuido	613	883	1.301
H CANAL	1	Usuario	Distribuido	3,75	6,58	11,26
KSAT	1	Usuario	Concentrado	----	0,6	----
G CANAL	1	Usuario	Concentrado	----	407	----

INT: Altura de intercepción (mm), COVER: Fracción de superficie cubierta por cobertura (%), MANN_N: Coeficiente de rugosidad de Manning para cuenca, PCT_IMPERV: Porcentaje impermeable (%), PAVE: Fracción de superficie erosionable (0-1), SPLASH: Coeficiente de salpicadura, ROCK: Fracción volumétrica de roca, KS: Conductividad hidráulica saturada (mm/hr), G: Tensión capilar media (mm), POR: Porosidad (cm³/cm³), SMAX: Máxima saturación relativa, CV: Coeficiente de variación de KS, Fracción de arena (0-1), Fracción de limo (0-1), Fracción de arcilla (0-1), DIST: Índice de distribución del tamaño de los poros (λ), COHESION: Coeficiente de cohesión del suelo, SA: saturación relativa inicial de la capa superior del suelo (0-1), n CANAL: coeficiente de rugosidad de Manning para canal, B CANAL: ancho del canal (m), H CANAL: profundidad del canal (m), KSAT: Conductividad hidráulica saturada del fondo del canal (mm/hr), G CANAL: Tensión capilar media del fondo del canal (mm).

En los Anexos XI y XII se pueden ver los archivos de precipitación y de parámetros generados por el modelo.

La Figura N° 7.4 muestra el mapa de caudales máximos y escurrimientos obtenido para el evento simulado.

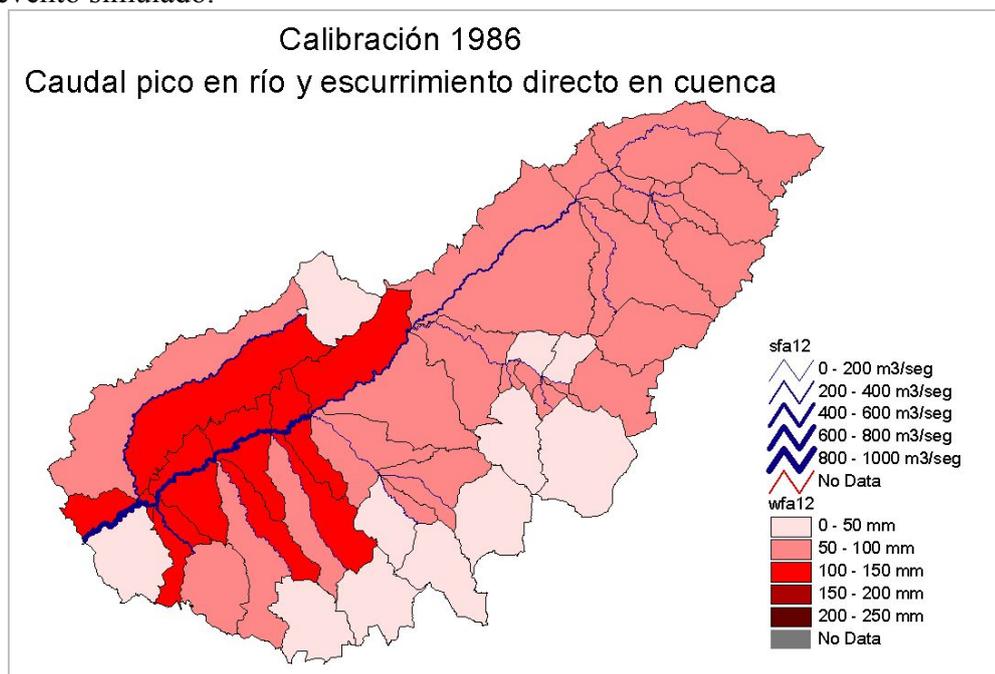


Figura N° 7.4: Caudales máximos y escurrimientos simulados del evento de abril de 1986.

7.2. EVENTO DE ABRIL DE 1996

La tormenta se desarrolló entre los días 24 y 25 de abril de 1996, con una lluvia total areal de 142,4 mm.. La precipitación caída en los 30 días antecedentes fue de 126 mm. La Tabla N° 7.4 muestra los datos de lluvia registrados del evento.

Tabla N° 7.4: Datos de lluvia del evento de abril de 1996

N°	Estación	Precipitación (mm)		Total (mm)
		24-abr-86	25-abr-86	
1	Banderas	200		200
2	Colonia N° 3	113	98	211
3	El Carmen	61	98	159
4	Estacas	160	3	163
5	Federal	161		161
6	Feliciano	39	45	84
7	La Esmeralda	70		70
8	La Lila	35	33	68
9	La Paz	160	4	164
10	La Vervena	30	54	84
11	San Gustavo	209		209
12	San Jaime	121		121
13	San Victor	41	66	107

La Figura N° 7.5 muestra los polígonos de Thiessen obtenidos con ArcView para el cálculo de la precipitación areal.



Figura N° 7.5: Polígonos de Thiessen para el evento de abril de 1996

La Figura N° 7.6 muestra el mapa de isohietas de lluvia total del evento.

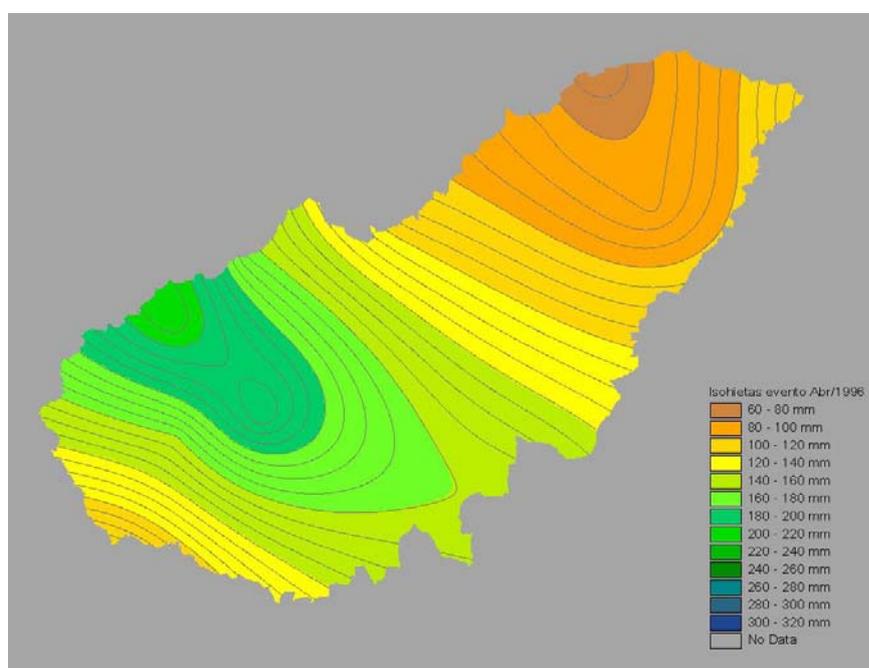


Figura N° 7.6: Isohietas de lluvia total del evento de abril de 1996

Se observa que las mayores precipitaciones se produjeron sobre la cuenca baja, con el núcleo sobre la subcuenca del A° Estacas, de manera similar al evento de abril de 1986.

La calibración obtenida resultó satisfactoria. El coeficiente de eficiencia fue de 0,89 y el error estándar de 85,1 m³/seg, con un caudal medio observado de 223,5 m³/s. Los errores relativos fueron: del caudal máximo, 9 % y del volumen de escurrimiento, -20 %.

La Figura N° 7.7 muestra los hidrogramas observado y simulado.

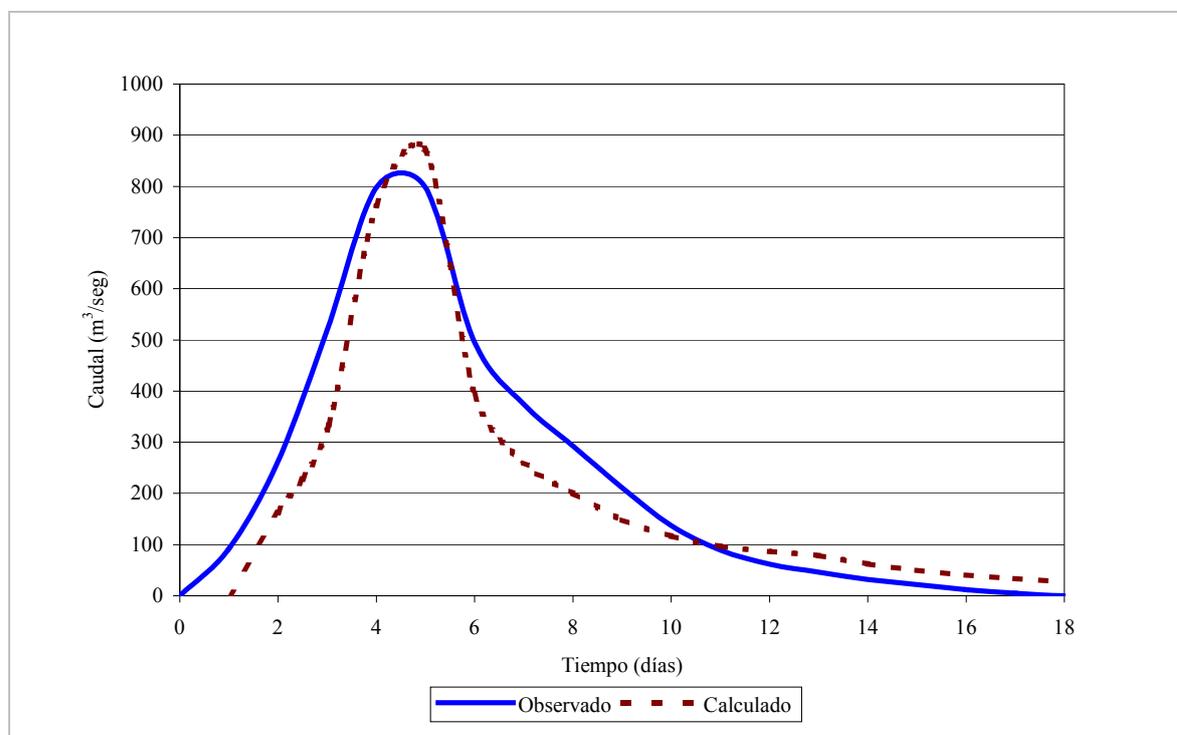


Figura N° 7.7: Hidrogramas observado y simulado del evento de abril de 1996

En la Tabla N° 7.5 se listan los parámetros del modelo, los multiplicadores aplicados, el origen de los valores de los parámetros, la variabilidad espacial de los mismos y los valores mínimo, medio y máximo obtenidos.

Tabla N° 7.5: Parámetros de calibración del evento de abril de 1996

Parámetro	Mult.	Origen	Variabilidad	Valores		
				Mínimo	Medio	Máximo
INT	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,86	1,22	1,70
COVER	1	Uso/Cobertura	Distribuido	23,20	28,61	34,80
MANN N	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,099	0,145	0,165
PCT IMPERV	---	Uso/Cobertura	Distribuido	0	0	0
PAVE	1	Tipo de suelo	Distribuido	0	0	0
SPLASH	1	Tipo de suelo	Distribuido	114,1	123,9	131,7
ROCK	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,05	0,06	0,15
KS	0.9	Tipo de suelo	Distribuido	0.48	1,74	3,54
G	1	Tipo de suelo	Distribuido	259	325	407
POR	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,462	0,469	0,478
SMAX	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,80	0,83	0,84
CV	1	Tipo de suelo	Distribuido	0,48	0,73	0,94
PCT_SAND	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,13	0,32	0,4
PCT_SILT	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,12	0,19	0,29

Parámetro	Mult.	Origen	Variabilidad	Valores		
				Mínimo	Medio	Máximo
PCT CLAY	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,40	0,49	0,63
DIST	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,16	0,20	0,24
COHESION	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,0007	0,0008	0,0008
SA	---	Usuario	Concentrado	----	0,4	----
n CANAL	1,4	Usuario	Concentrado	----	0,14	----
B CANAL	1	Usuario	Distribuido	613	883	1.301
H CANAL	1	Usuario	Distribuido	3,75	6,58	11,26
KSAT	1	Usuario	Concentrado	----	0,6	----
G CANAL	1	Usuario	Concentrado	----	407	----

La Figura N° 7.8 muestra el mapa de caudales máximos y escurrimientos obtenido para el evento simulado.

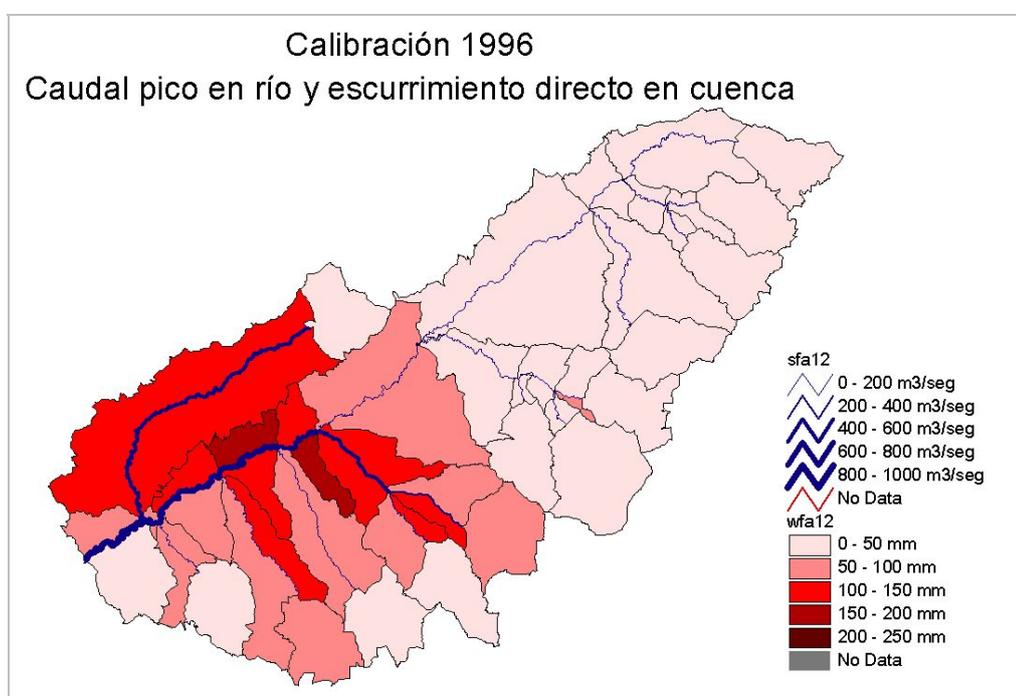


Figura N° 7.8: Caudales máximos y escorrentía simulados del evento de abril de 1996

7.3. EVENTO DE FEBRERO DE 2005

La tormenta se desarrolló entre los días 6, 7 y 8 de febrero del 2005, con una lluvia total areal de 174,2 mm. La precipitación caída en los 30 días antecedentes fue de 180 mm. La Tabla N° 7.6 muestra los datos de lluvia registrados del evento.

Tabla N° 7.6: Datos de lluvia del evento de febrero de 2005

N°	Estación	Precipitación (mm)			Total (mm)
		06-Feb-05	07-Feb-05	08-Feb-05	
1	Banderas	65		90	155
2	Cto. Bernardi	112	183		295
3	El Carmen	210			210
4	El Cimarrón	43	220		263
5	El Quebracho	250	60		310
6	Estacas	50	133		183
7	Federal		132	70	202
8	Feliciano	3	47	51	101
9	La Calandria	29	136	16	181
10	La Esmeralda	35	32		67
11	La Lila	134	108	18	260
12	La Vervena	67	27		94
13	San Gustavo	45	95	117	257
14	San Jaime	40	30		70

La Figura N° 7.9 muestra los polígonos de Thiessen obtenidos con ArcView para el cálculo de la precipitación areal.



Figura N° 7.9: Polígonos de Thiessen para el evento de febrero de 2005

La Figura N° 7.10 muestra el mapa de isohietas de lluvia total del evento. Se observa que las mayores precipitaciones ocurrieron en la cuenca baja.

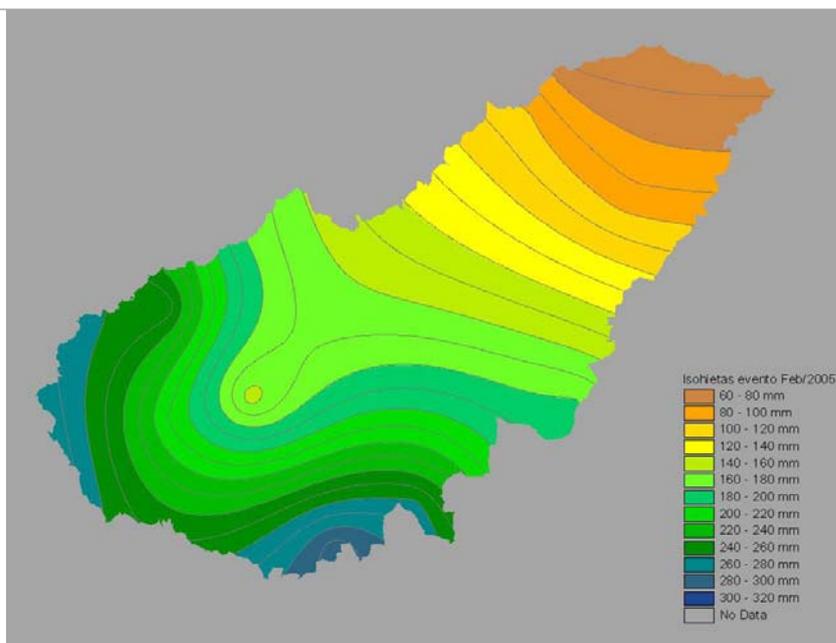


Figura N° 7.10: Isohietas de lluvia total del evento de febrero de 2005

La calibración obtenida resultó satisfactoria. El coeficiente de eficiencia fue de 0,79 y el error estándar de 133,4 m³/seg, con un caudal medio observado de 321,5 m³/seg. Los errores relativos fueron: del caudal máximo, 11 % y del volumen de escurrimiento, -17 %. La Figura N° 7.11 muestra los hidrogramas observado y calculado.

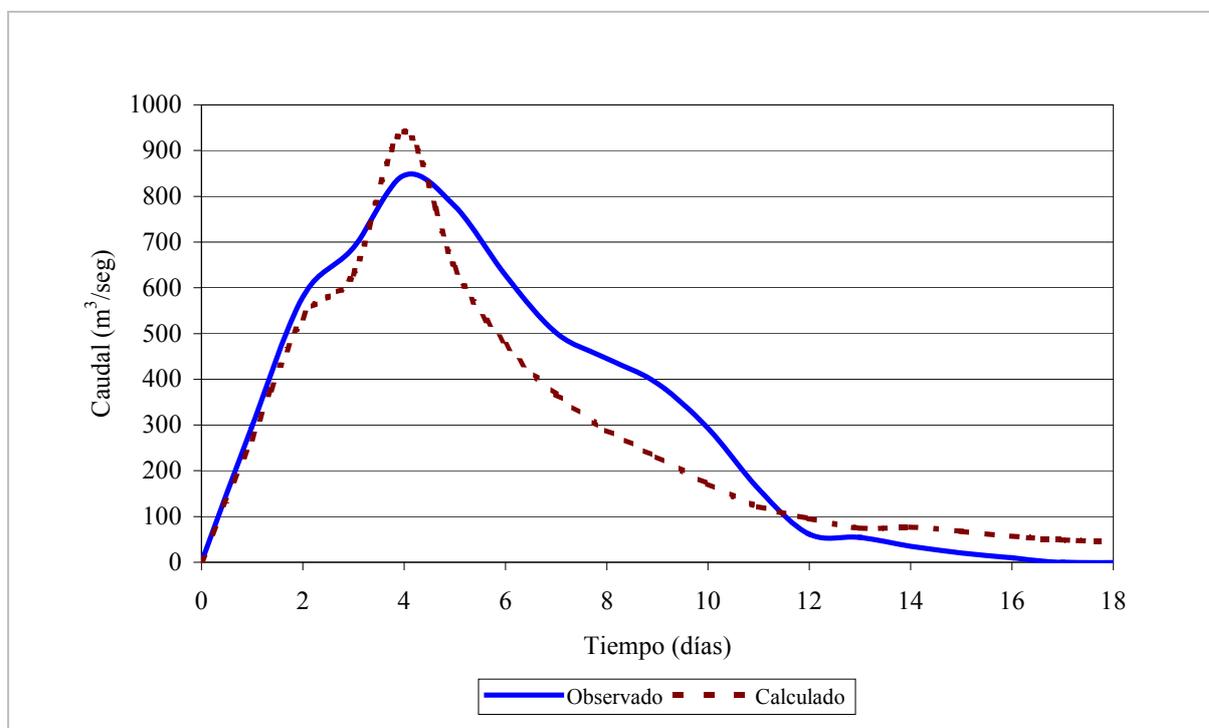


Figura N° 7.11: Hidrogramas observado y simulado del evento de febrero de 2005

En la Tabla N° 7.7 se listan los parámetros del modelo, los multiplicadores aplicados, el origen de los valores de los parámetros, la variabilidad espacial de los mismos y los valores mínimo, medio y máximo obtenidos.

Tabla N° 7.7: Parámetros de calibración del evento de febrero del 2005

Parámetro	Mult.	Origen	Variabilidad	Valores		
				Mínimo	Medio	Máximo
INT	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,86	1,26	1,80
COVER	1	Uso/Cobertura	Distribuido	23,85	29,27	34,9
MANN_N	1	Uso/Cobertura	Distribuido	0,099	0,143	0,175
PCT_IMPERV	---	Uso/Cobertura	Distribuido	0	0	0
PAVE	1	Tipo de suelo	Distribuido	0	0	0
SPLASH	1	Tipo de suelo	Distribuido	114,1	123,9	131,7
ROCK	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,05	0,06	0,15
KS	0.8	Tipo de suelo	Distribuido	0.42	1,54	3,14
G	1	Tipo de suelo	Distribuido	259	325	407
POR	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,462	0,469	0,478
SMAX	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,80	0,83	0,84
CV	1	Tipo de suelo	Distribuido	0,48	0,73	0,94
PCT_SAND	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,13	0,32	0,4
PCT_SILT	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,12	0,19	0,29
PCT_CLAY	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,40	0,49	0,63
DIST	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,16	0,20	0,24
COHESION	---	Tipo de suelo	Distribuido	0,0007	0,0008	0,0008
SA	---	Usuario	Concentrado	----	0,5	----
n CANAL	1,4	Usuario	Concentrado	----	0,14	----
B CANAL	1	Usuario	Distribuido	613	883	1.301
H CANAL	1	Usuario	Distribuido	3,75	6,58	11,26
KSAT	1	Usuario	Concentrado	----	0,6	----
G CANAL	1	Usuario	Concentrado	----	407	----

La Figura N° 7.12 muestra el mapa de caudales máximos y escurrimientos obtenido para el evento simulado.

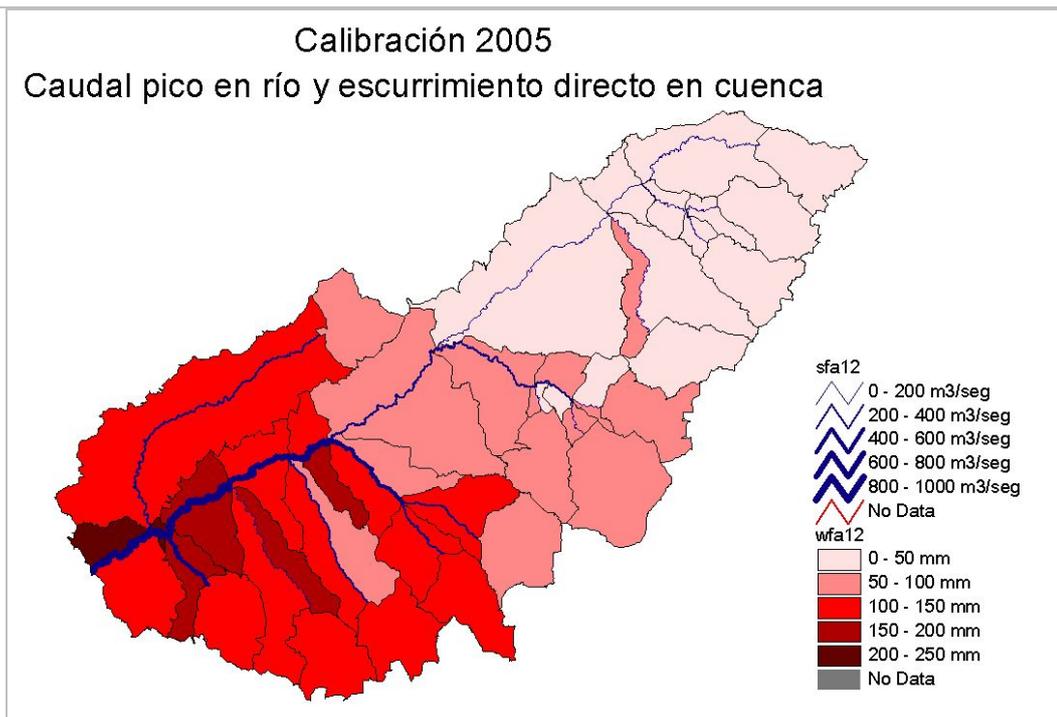


Figura N° 7.12: Caudales máximos y escurrimiento simulados del evento de febrero de 2005

Los caudales máximos y escurrimientos observados, los correspondientes valores obtenidos de la simulación y los errores relativos correspondientes se sintetizan en la Tabla N° 7.8.

Tabla N° 7.8: Caudales máximos y escurrimientos observados y simulados

Evento	Caudal máximo			Escurrimiento directo		
	Observado (m ³ /seg)	Calculado (m ³ /seg)	Error relativo (%)	Observado (hm ³)	Calculado (hm ³)	Error relativo (%)
1986	705	675	-4	325	336	3
1996	798	870	9	367	290	-20
2005	846	941	11	500	417	-17

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para los tres eventos simulados, las zonas con mayores escurrimientos se ubican en la cuenca baja, en correspondencia con la ubicación de las mayores lluvias.

Los parámetros del modelo KINEROS2 asociados a la cobertura de suelo para una cuenca rural son tres: INT (profundidad de intercepción en mm), COVER (porcentaje de cobertura), N (coeficiente de rugosidad de Manning para flujo superficial). Los 3 parámetros tienen incidencia sobre el volumen de escurrimiento simulado.

A partir de los valores por subcuenca, se calcularon los valores medios de los parámetros para la cuenca total, para cada uno de los escenarios de cobertura considerados (Tabla N° 7.9).

Tabla N° 7.9: Valores medios de los parámetros de cobertura para la cuenca del A° Feliciano

Cobertura	Int (mm)	Cover (%)	N
1986	1,29	28,47	0,149
1997	1,22	28,61	0,145
2006	1,26	29,27	0,143

Se puede observar que los valores de los parámetros no varían de manera significativa entre escenarios, para la escala de la cuenca total.

Los resultados obtenidos muestran una disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo media areal (KS) para los escenarios 1997 (1,74 mm/h) y 2006 (1,54 mm/h) respecto del escenario de 1986 (1,93 mm/h).

La disminución de KS, aplicada en forma agregada a todas las subcuencas por simplicidad del tratamiento, puede interpretarse físicamente como la consecuencia del proceso de destrucción de la estructura de los suelos destinados a uso agrícola. Como se ha descrito en el Capítulo 4, los suelos molisoles y vertisoles de la cuenca en estudio son afectados severamente por el manejo agrícola, que provoca pérdida de materia orgánica, erosión y compactación. La destrucción de la estructura origina una disminución de la conductividad hidráulica (Cerana et al., 2005).

CAPÍTULO 8: EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO ENTRE ESCENARIOS

8.1. ANÁLISIS A ESCALA DE LA CUENCA TOTAL

Se evaluaron los cambios de usos/coberturas del suelo en la cuenca en estudio entre los escenarios 1986, 1997 y 2006. A efectos de simplificar el tratamiento, se reagruparon las 9 clases de uso/cobertura descritas en el Capítulo 6 (Tabla N° 6.5) en 4 nuevas clases: a) Bosque y Monte, b) Actividad agrícola (Cultivo1, Cultivo2, Barbecho, Suelo Desnudo y Suelo Quemado), c) Pasturas y d) Agua. Las superficies de las clases reagrupadas para cada escenario se muestran en la Tabla N° 8.1.

Tabla N° 8.1: Distribución de la superficie de la cuenca del A° Feliciano para las clases de uso/cobertura reagrupadas

Clase de uso/ cobertura	Año 1986		Año 1997		Año 2006	
	Superficie		Superficie		Superficie	
	(has)	(%)	(has)	(%)	(has)	(%)
Bosque y Monte	443.401	80,0	432.976	78,1	407.413	73,5
Actividad Agrícola	29.341	5,3	47.680	8,6	58.290	10,5
Pastura	81.328	14,7	73.295	13,2	87.174	15,7
Agua	54	0,0	173	0,1	1.246	0,3

Se puede observar que entre los años 1986 y 2006, la superficie correspondiente a Bosque y Monte tuvo una disminución que representa el **6,5 % (36.000 has)** de la superficie total de la cuenca.

La superficie perdida de Bosque y Monte se destinó principalmente a agricultura y pastura. La superficie correspondiente a la Actividad Agrícola aumentó el **5,2 %** y la correspondiente a Pastura aumentó del **1,0 %** de la superficie de la cuenca.

La superficie correspondiente a Agua experimentó un pequeño aumento debido a la construcción de embalses en la cuenca alta, destinados al riego de arroz.

Con el objeto de conocer la distribución espacial de la superficie con cambios de uso/cobertura entre escenarios, se elaboraron mapas de cambios aplicando el software ERDAS IMAGINE. Éste permite realizar la comparación de 2 imágenes clasificadas, siempre que tengan correspondencia geográfica y de clases, construyendo una nueva imagen con su correspondiente tabla de atributos (matriz de comparación), donde se identifican los píxeles de cada una de las clases en la primer imagen y si han permanecido en esa misma o han cambiado a alguna de las otras clases posibles en la segunda imagen.

A la imagen creada se cambiaron los colores en la tabla de atributos, asignando un color claro (verde) para los píxeles que han permanecido en la clase de Bosques, Monte y Pastura y otro distinto (negro) para los que han cambiado, como se muestra en la Figura N°8.1.

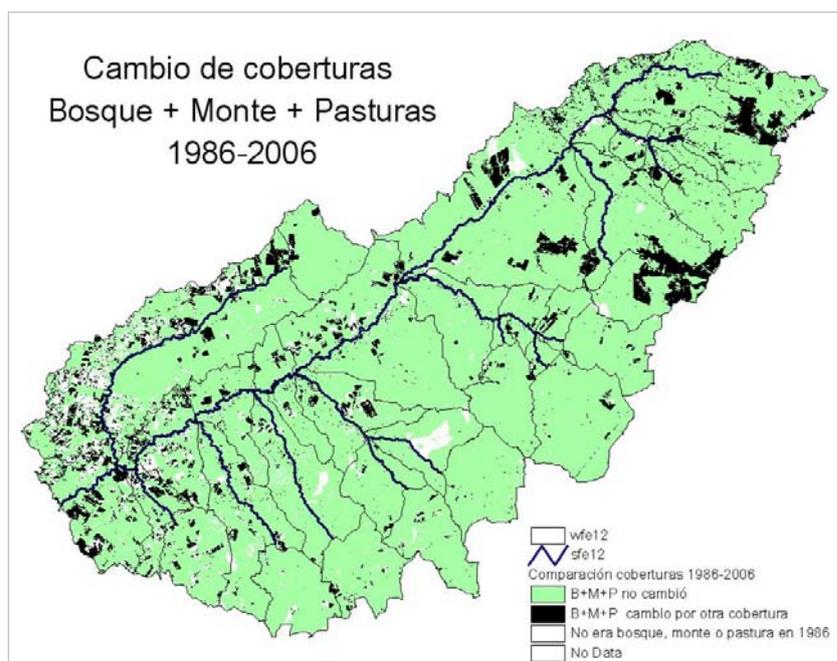


Figura N° 8.1: Mapa de cambios de la clase Bosque+monte+pastura entre los años 1986 y 2006

Se observa que los cambios de uso/cobertura se produjeron principalmente en zonas próximas a la red de drenaje, particularmente en el tramo medio e inferior de A° Feliciano y en la subcuenca del A° Estacas.

Si se analiza en forma comparativa esta figura con el mapa de suelos de la cuenca (Figura N° 3.7), puede observarse que **la mayor parte de los cambios de usos/coberturas del suelo en la cuenca en estudio se producen sobre suelos Vertisoles y Molisoles.**

8.2. ANÁLISIS A ESCALA LOCAL

Se evaluaron los cambios de uso/cobertura del suelo en la subcuenca 253, ubicada en la margen izquierda del A° Feliciano, inmediatamente aguas arriba de Paso Medina. Se seleccionó esta subcuenca para el análisis local debido a que es una de las que experimentaron mayores cambios en el período de análisis. La superficie de esta subcuenca es de 138,4 km².

Para analizar los cambios se realizó el mismo agrupamiento de clases que para la cuenca total. Los resultados obtenidos pueden observarse en la Tabla N° 8.2.

Tabla N° 8.2: Distribución de la superficie de la subcuenca 253 para las clases de uso/cobertura reagrupadas

Clase de cobertura	Año 1986		Año 1997		Año 2006	
	Superficie		Superficie		Superficie	
	(has)	(%)	(has)	(%)	(has)	(%)
Bosque y Monte	11.988	86,6	11.021	79,6	9.946	71,9
Activ. Agrícola	980	7,1	2.791	20,2	3.097	22,4
Pastura	868	6,3	24	0,2	794	5,7
Agua	2	0,0	2	0,0	4	0,0

Se puede observar que entre los años 1986 y 2006, la superficie correspondiente a Bosque y Monte tuvo una disminución que representa el **14,7 % (2.000 has)** de la superficie total de la subcuenca. La superficie de pastura también disminuyó, aunque sólo en el **0,6 %** de la superficie total.

Las superficies perdidas de Bosque y Monte y de Pastura se destinaron a agricultura, cuya superficie aumentó en el **15,3 %** de la superficie de la subcuenca.

La Figura N° 8.2 y Figura N° 8.3 muestran los mapas de usos/coberturas para los años 1986 y 2006, respectivamente.

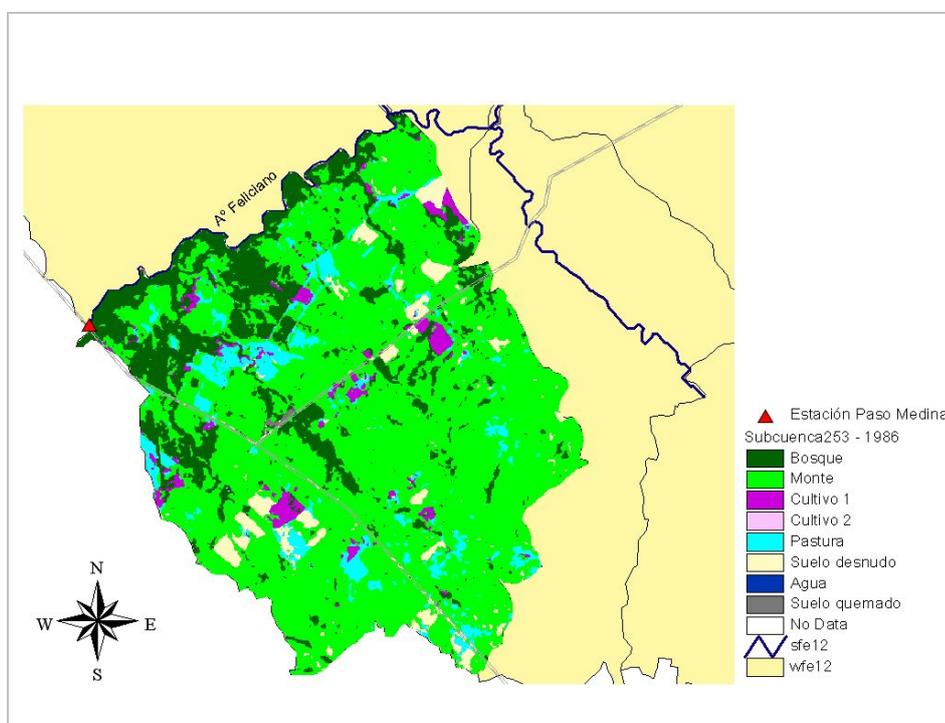


Figura N° 8.2: Mapa de usos/coberturas del suelo de la subcuenca 253 correspondiente al escenario 1986

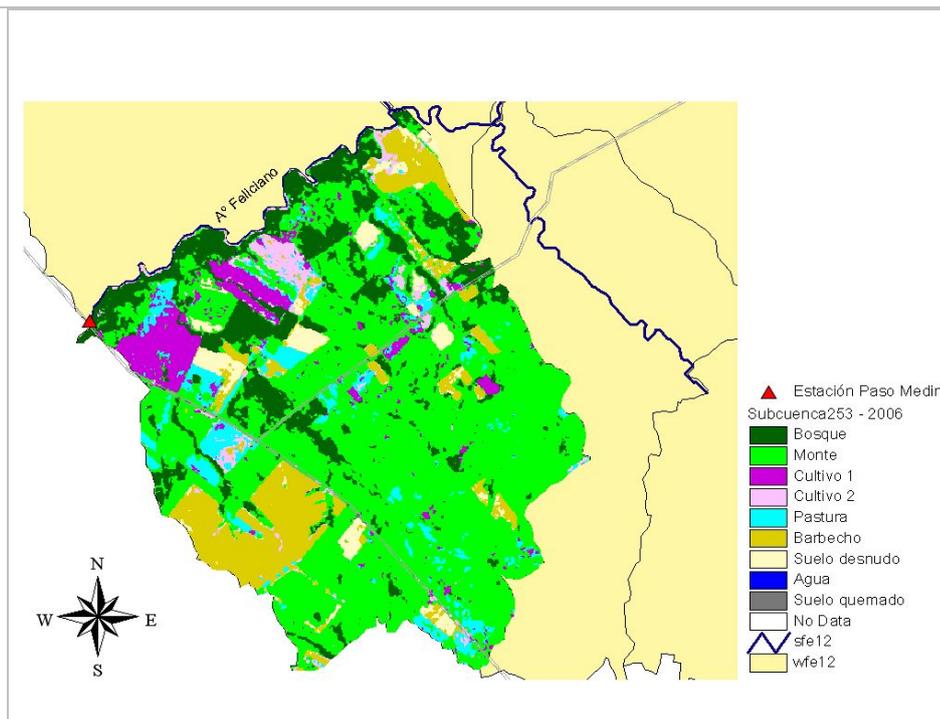


Figura N° 8.3: Mapa de usos/coberturas del suelo de la subcuenca 253 correspondiente al escenario 2006

Si se comparan detalladamente las dos últimas figuras, se puede observar claramente que sectores que en el año 1986 correspondían a las clases Monte y Bosque, cambiaron a una actividad agrícola en 2006, ya sea Cultivo, Barbecho y Suelo Desnudo.

CAPÍTULO 9: EFECTOS DE CAMBIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO SOBRE LA ESCORRENTÍA Y LOS CAUDALES MÁXIMOS

9.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Se evaluaron los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía y los caudales máximos en la cuenca en estudio. Para ello, se aplicó el modelo calibrado para cada escenario de usos/coberturas (1986, 1997, 2006) considerando como entrada una única tormenta sintética para todos los escenarios.

Los efectos se evaluaron a través de la variación entre escenarios del caudal máximo, de la escorrentía y del coeficiente de escorrentía. La evaluación se realizó a la escala de la cuenca total y a la escala local de la subcuenca 253. Para esta subcuenca, además, se evaluaron los efectos para dos escenarios de usos/coberturas hipotéticos futuros.

9.2. TORMENTA SINTÉTICA ADOPTADA

La tormenta sintética se adoptó con una altura de lluvia total máxima para 5 años de recurrencia, una duración de 6 horas, una distribución espacial uniforme y una condición de humedad antecedente promedio del suelo.

La consideración de una única tormenta sintética para todos los escenarios permite separar los efectos que tendrían distintas distribuciones espacio-temporales de la lluvia y condiciones de humedad antecedente sobre los hidrogramas simulados.

La recurrencia adoptada se corresponde con crecidas que superan la capacidad de conducción del cauce principal y ocupan el valle de inundación, de manera similar a lo que ocurre con los eventos de calibración. La duración adoptada es mayor a los tiempos de concentración de todas las subcuencas. Para la condición de humedad antecedente, se adoptó un valor del parámetro SA igual a 0.4.

Los datos para calcular la tormenta sintética fueron extraídos de la publicación “Tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos” (fuente: Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia - Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada (GIHHA), 2008). Se seleccionó la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de la estación de Feliciano. La tormenta sintética adoptada se presenta en la Tabla N° 9.1 y en la Figura N° 9.1.

Tabla N° 9.1: Tormenta sintética.

Duración (min)	Precipitación acumulada (mm)
60	15
120	68
180	95
240	105
300	111
360	114

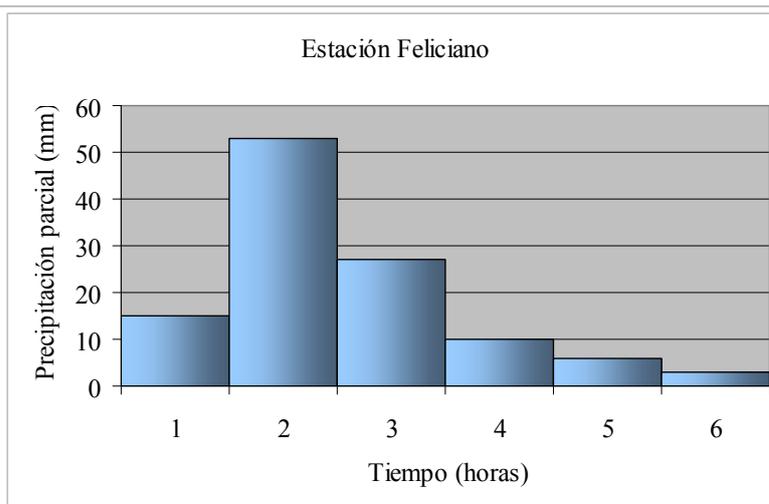


Figura N° 9.1: Hietograma de la tormenta sintética

9.3. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS PARA LOS ESCENARIOS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO DE 1986, 1997 Y 2006

Se realizaron simulaciones con el modelo para los tres escenarios considerados, considerando como entrada la tormenta sintética adoptada. Se presentan a continuación los resultados obtenidos y las evaluaciones a las escalas de la cuenca total y de la subcuenca 253.

Evaluación a escala de la cuenca total

La Figura N° 9.2 muestra los hidrogramas simulados en Paso Medina para los escenarios considerados. En la Tabla N° 9.2 se muestran los parámetros de dichos hidrogramas.

Tabla N° 9.2: Parámetros de hidrogramas simulados en Paso Medina para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados

Escenario de usos/coberturas	P (mm)	Qp (m ³ /seg)	Esc. (hm ³)	Esc. (mm)	CE	Variación (%)	
						Qp	Esc.
1986	114	254,4	171,3	30,9	0,27	---	---
1997	114	301,0	202,6	36,5	0,32	18	18
2006	114	317,5	214,1	38,6	0,34	25	25

P: precipitación, Qp: caudal máximo, Esc.: escurrimiento, CE: coeficiente de escorrentía.

En el Anexo XIII se puede observar parte del archivo de salida generado para cada simulación.

Se observa que entre los escenarios 1986 y 2006, el caudal máximo y la escorrentía aumentaron un **25%**, mientras que el coeficiente de escorrentía medio areal aumentó de **0,27** a **0,34**.

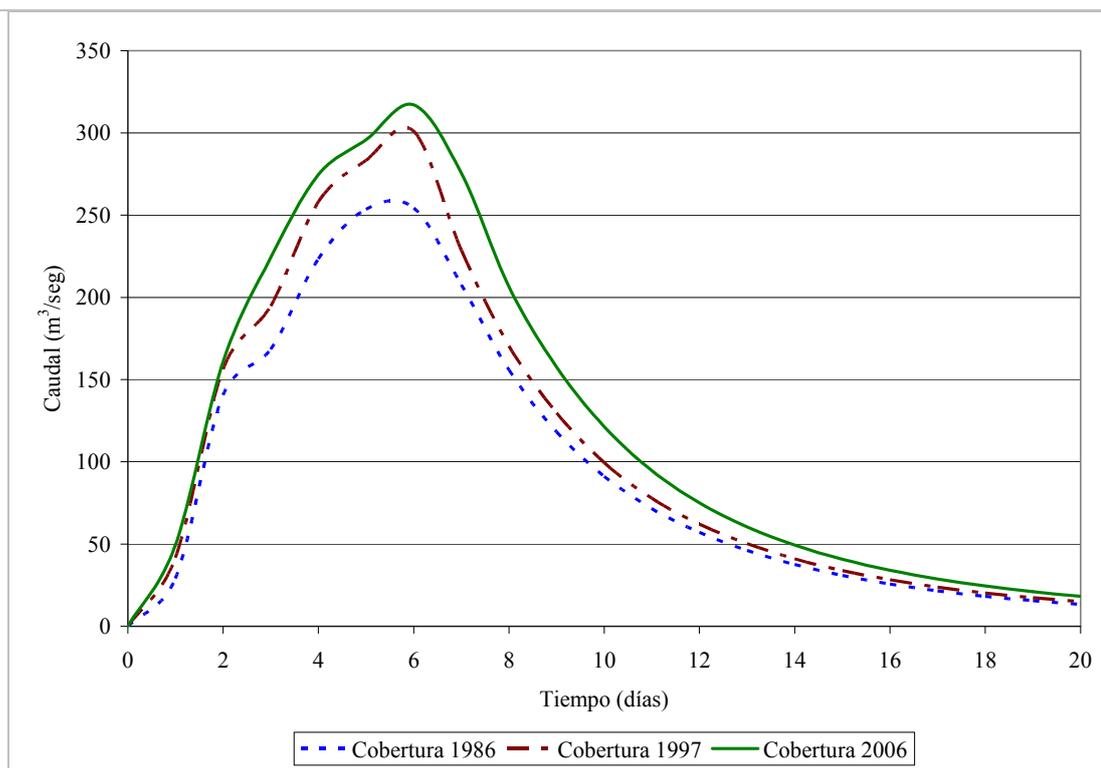


Figura N° 9.2: Hidrogramas simulados en Paso Medina para la tormenta sintética y los escenarios de uso/cobertura del suelo considerados

Se analizaron las variaciones espacio-temporales de la escorrentía directa y de los caudales máximos simulados. A tal efecto, se elaboraron mapas de estas variables para los escenarios de usos/coberturas de 1986 (Figura N° 9.3) y 2006 (Figura N° 9.4).

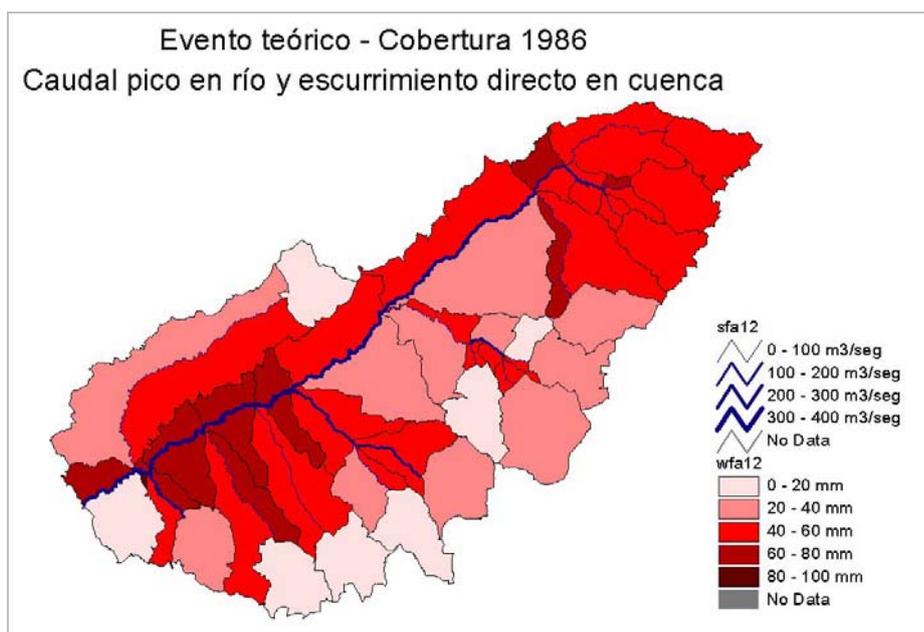


Figura N° 9.3: Caudales máximos y escurrimientos simulados para la tormenta sintética y el escenario de 1986

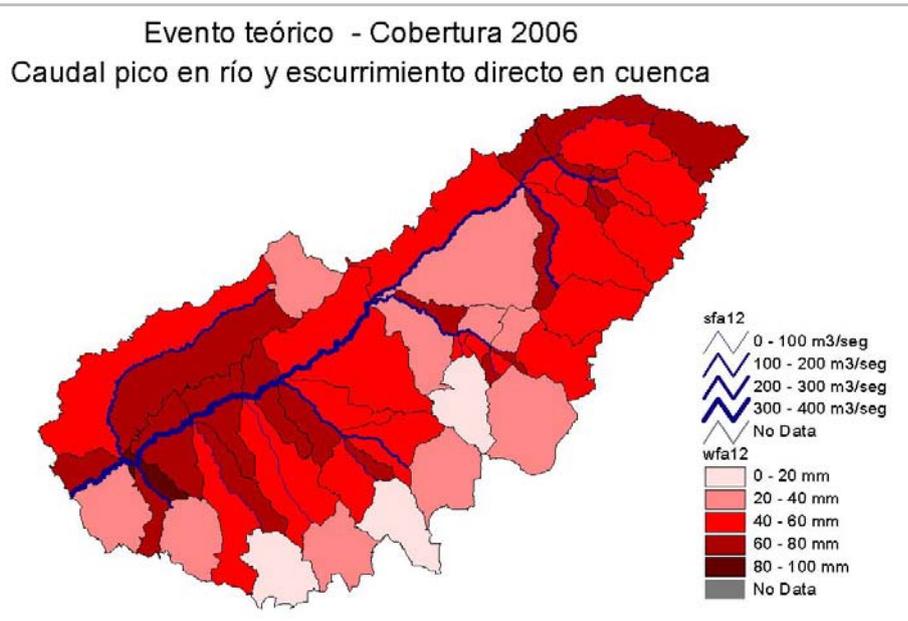


Figura N° 9.4: Caudales máximos y escurrimientos simulados para la tormenta sintética y el escenario de 2006

Para ambos escenarios, se observa que las mayores escorrentías se producen en sectores adyacentes a la red de drenaje. Esto es debido a que dichos sectores están ocupados por suelos de baja conductividad hidráulica. La literatura denomina “áreas fuente” (Linsley, 1977; Chow, 1994) a estas zonas activas en cuanto a la generación de escorrentía.

Por otra parte, se observa un **aumento general de la escorrentía y de los caudales máximos al pasar del escenario de 1986 al de 2006**, lo que es **coherente con la disminución del parámetro KS para este último escenario**.

Se elaboró un mapa del coeficiente de escorrentía para cada escenario de usos/coberturas. Dado que el modelo no calcula dicho coeficiente, se lo obtuvo operando en la tabla de atributos de las subcuencas. En esta tabla se creó un nuevo campo para el coeficiente, calculado como cociente entre el escurrimiento directo y la precipitación total de la tormenta. Los valores obtenidos para los escenarios de 1986 y 2006 se muestran en Figura N° 9.5 y Figura N° 9.6, respectivamente.

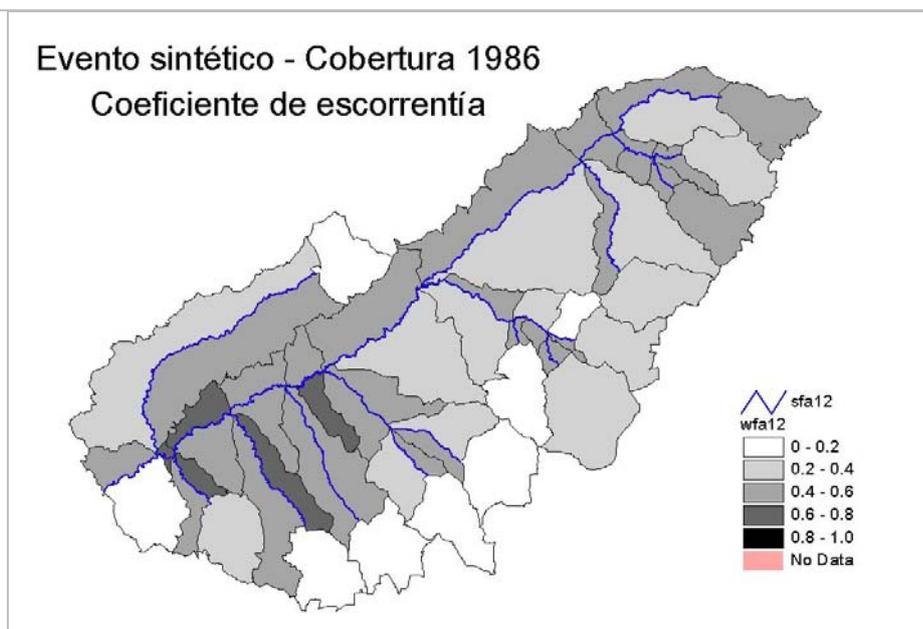


Figura N° 9.5: Coeficientes de escorrentía para el escenario 1986

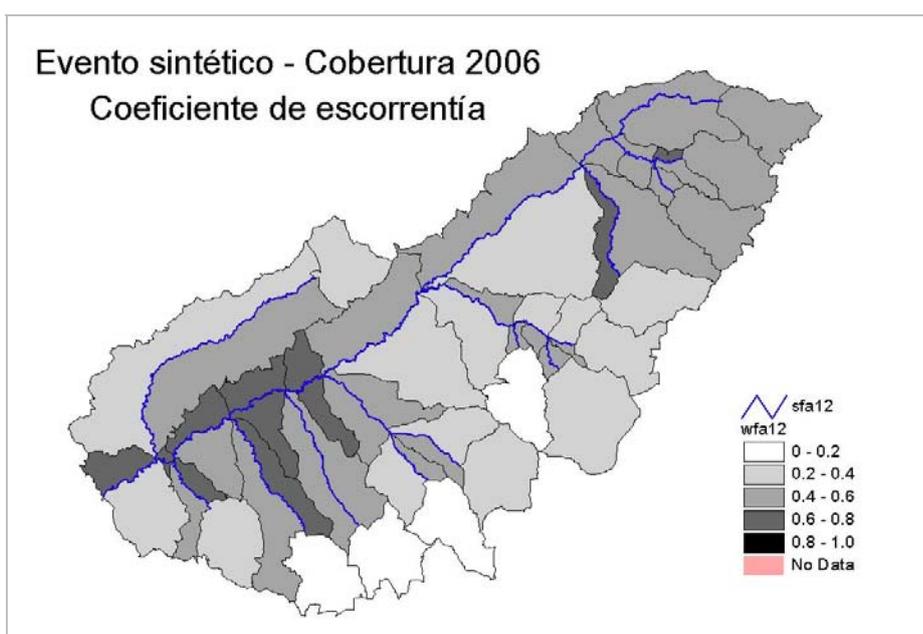


Figura N° 9.6: Coeficientes de escorrentía para el escenario 2006

Para ambos escenarios, se observa que los mayores coeficientes de escorrentía se ubican en sectores adyacentes a la red de drenaje y que existe un aumento general de los valores al pasar del escenario de 1986 al de 2006.

A partir de los resultados obtenidos a la escala de la cuenca total se concluye que el aumento de la superficie agrícola en detrimento de bosques y montes, registrado en la cuenca en estudio en el período 1986/2006, ha originado un aumento tanto de la escorrentía como de

los caudales máximos. Para la tormenta sintética considerada, dichos aumentos son significativos, del 25% en ambos casos.

Los aumentos de la escorrentía y de los caudales máximos se explican principalmente **por la baja a muy baja resistencia a la erosión de los suelos vertisoles y molisoles** cuando son sometidos a uso agrícola. Como se ha descrito, estos suelos ocupan el 49.5% de la superficie total de la cuenca y se desarrollan en zonas próximas a la red de drenaje. El uso agrícola provoca pérdida de materia orgánica, erosión y destrucción de la estructura, originando una disminución de la conductividad hidráulica. En consecuencia, bajo uso agrícola, estos suelos tienen **coeficientes de escorrentía próximos a la unidad** después de un humedecimiento prolongado.

Evaluación a escala local

La Figura N° 9.7 muestra los hidrogramas simulados a la salida de la subcuenca 253, para los escenarios considerados. Los parámetros de dichos hidrogramas se presentan en la Tabla N° 9.3.

Tabla N° 9.3: Parámetros de hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados

Escenario de usos/coberturas	P (mm)	Qp (m ³ /seg)	Esc. (hm ³)	Esc. (mm)	CE	Variación (%)	
						Qp	Esc.
1986	114	80,3	2,1	15,0	0,13	---	---
1997	114	96,6	2,7	19,6	0,17	20	30
2006	114	103,1	3,2	23,2	0,20	28	55

Se observa que entre los escenarios 1986 y 2006, la escorrentía aumentó un **55%** y el caudal máximo un **28%**, mientras que el coeficiente de escorrentía aumentó de **0,13** a **0,20**.

Los aumentos de la escorrentía y del caudal máximo de la subcuenca 253 son mayores que para la cuenca total, debido a que la primera experimentó mayores cambios de usos/coberturas del suelo que la segunda.

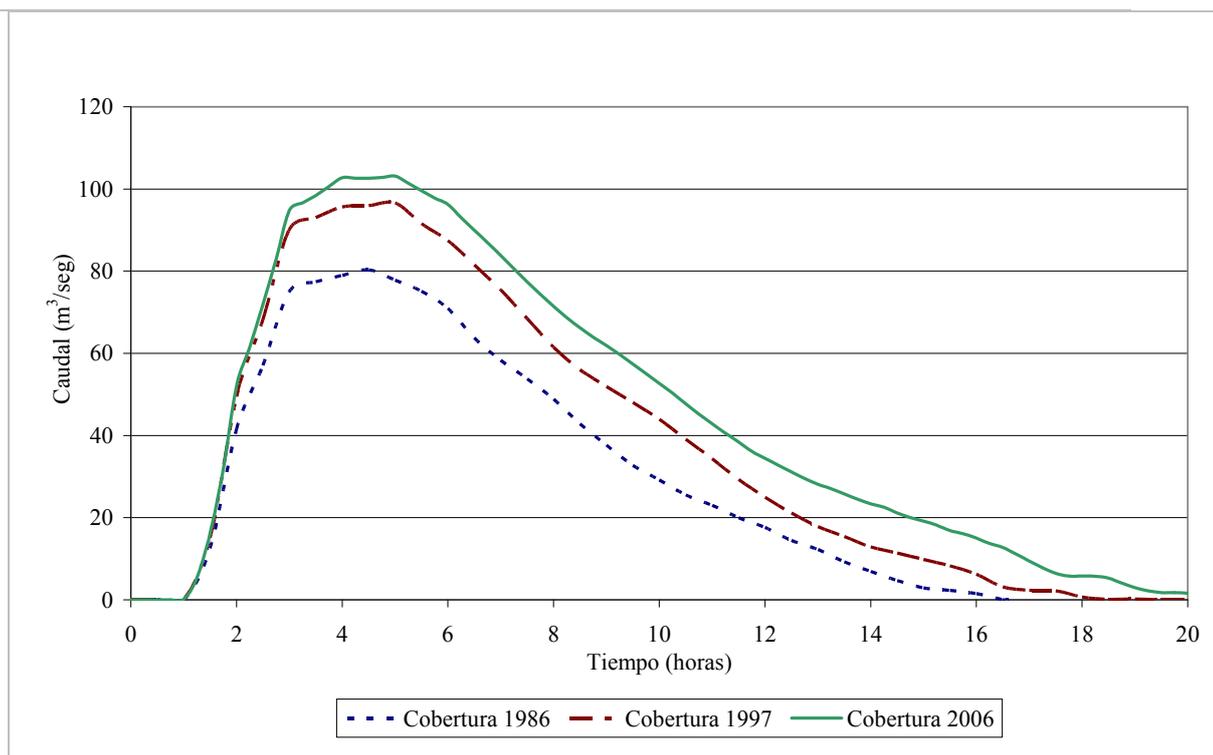


Figura N° 9.7: Hidrogramas obtenidos en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo considerados

9.4. EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS PARA ESCENARIOS HIPOTÉTICOS FUTUROS DE USOS/COBERTURAS DEL SUELO DE LA SUBCUENCA 253

Se evaluaron los efectos sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la subcuenca 253, originados por escenarios de usos/coberturas del suelo hipotéticos futuros, representativos de un mayor avance de la agricultura sobre los montes nativos y praderas.

A partir del mapa de usos/coberturas del suelo de la subcuenca 253 correspondiente al escenario de 2006 (Figura N° 8.3), se plantearon dos escenarios hipotéticos futuros:

- a) **Escenario Hipotético 1 (EH1):** la superficie con uso agrícola pasa a ser el **50,7%** de la superficie total. Esto implica considerar que la mitad de la superficie de “Monte” (clase 2) pasa a “Cultivo 1” (clase 3) y que el resto de las clases conserva sus valores originales.
- b) **Escenario Hipotético 2 (EH2):** la superficie con uso agrícola pasa a ser el **56,5%** de la superficie total. Esto implica que la mitad de la superficie de “Monte” (clase 2) y la totalidad de la superficie de “Pasturas” (clase 5), pasan a “Cultivo 1” (clase 3). El resto de las clases conserva sus valores originales.

Se realizaron simulaciones con el modelo para ambos escenarios y la tormenta sintética. La Figura N° 9.8 muestra los hidrogramas simulados a la salida de la subcuenca,

para los escenarios considerados. Los parámetros de dichos hidrogramas se presentan en la Tabla N° 9.4.

Tabla N° 9.4: Parámetros de hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios 1986, EH1 y EH2

Escenario de usos/coberturas	P (mm)	Qp (m ³ /seg)	Esc. (hm ³)	Esc. (mm)	CE	Variación (%)	
						Qp	Esc.
1986	114	80,3	2,1	15,0	0,13	0	0
EH1	114	135,0	4,1	29,5	0,26	68	97
EH2	114	143,3	4,2	30,7	0,27	78	105

Puede observarse que para los escenarios EH1 y EH2 la escorrentía aumentaría en un **97%** y un **105%**, respectivamente, mientras que el caudal máximo lo haría en un **68%** y un **78%**. Los coeficientes de escorrentía aumentarían de **0,13** (año 1986), a **0,26** para el EH1 y a **0,27** para el EH2.

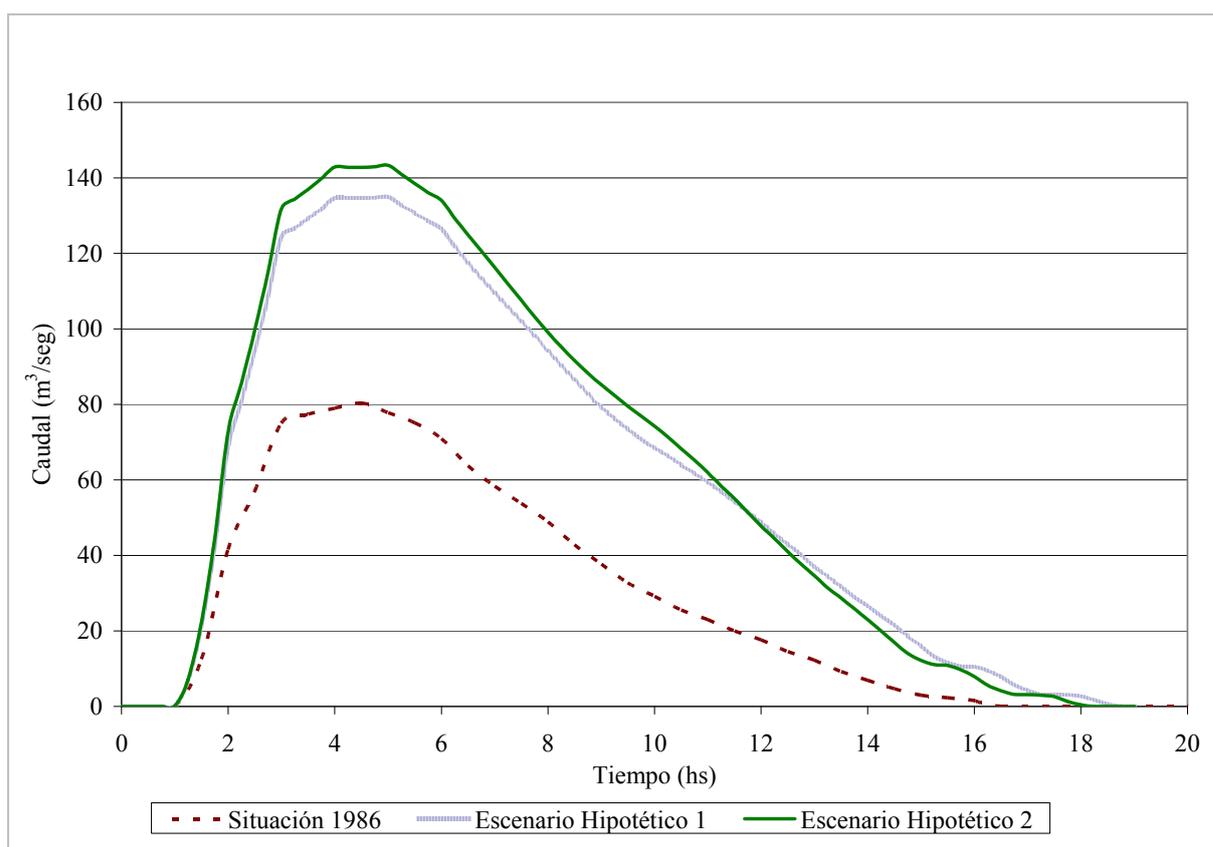


Figura N° 9.8: Hidrogramas simulados en la subcuenca 253 para la tormenta sintética y los escenarios de usos/coberturas del suelo de 1986 e hipotéticos

Cabe aclarar que para estos escenarios se han mantenido los valores de conductividad hidráulica saturada obtenidos de la calibración para el escenario de 2006. Sin embargo, los

escenarios hipotéticos planteados, de más intensa actividad agrícola, podrían originar una reducción aún mayor del parámetro, por lo que los resultados obtenidos pueden ser considerados como valores de base o umbrales, que pueden ser superados.

A partir de los resultados obtenidos para la subcuenca 253, se representaron gráficamente los valores del coeficiente de escorrentía de los distintos escenarios (1986, 2006, EH1 y EH 2) en función de la correspondiente superficie con actividad agrícola (Figura N°9.9).

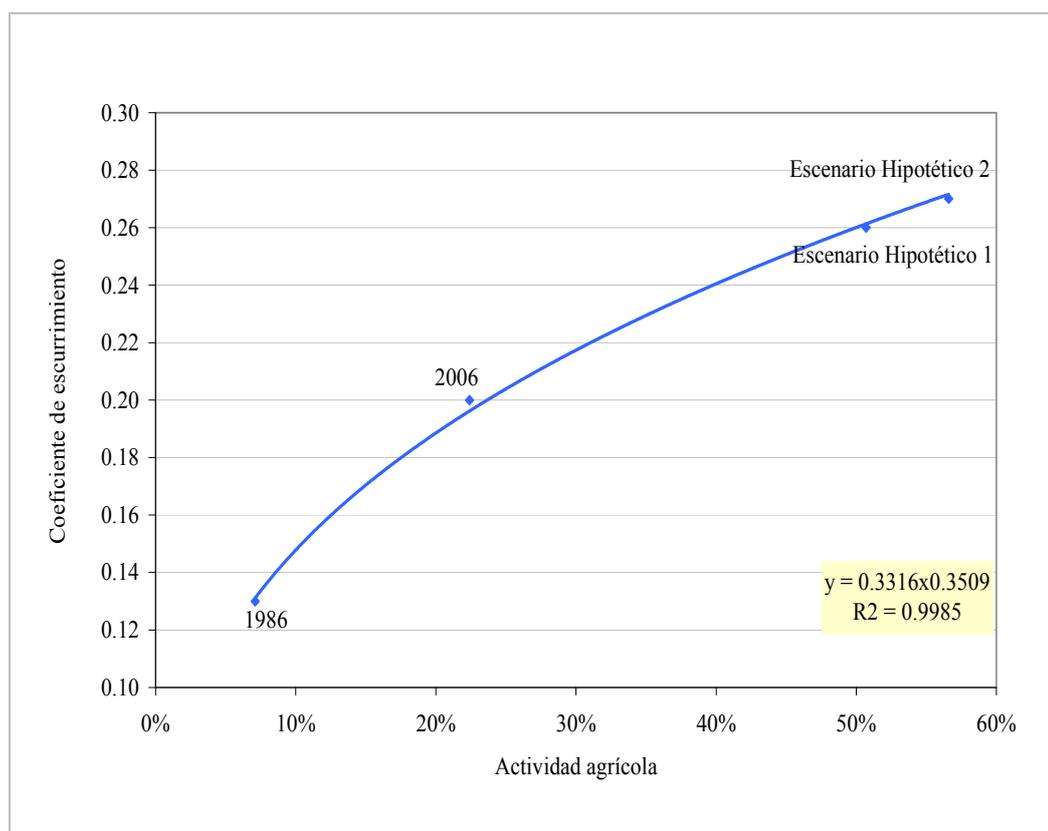


Figura N° 9.9: Coeficiente de escorrentía de la subcuenca 253 en función del porcentaje de superficie con uso agrícola

Los resultados obtenidos indican que a medida que aumenta la superficie agrícola, aumenta el coeficiente de escorrentía y que la tasa de aumento de éste disminuye, tendiendo a un valor de equilibrio (Tabla N° 9.5).

Tabla N° 9.5: Variación del coeficiente de escorrentía de la subcuenca 253 para distintos escenarios de usos/coberturas del suelo

Escenario de usos/coberturas	CE (%)	Sup. con uso agrícola (%)	Tasa
1986	13	7,1	---
2006	20	22,4	0,46
EH1	26	50,7	0,21
EH2	27	56,5	0,17

Entre los escenarios 1986 y 2006, el coeficiente de escorrentía aumentó a una tasa de 0,46% por cada 1% de aumento de superficie agrícola. Entre los escenarios EH1 y EH2, en cambio, el coeficiente aumentó a una tasa de 0,17% por cada 1% de aumento de superficie agrícola.

9.5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE DERRAME DE LA CUENCA

Se calcularon los valores anuales del coeficiente de derrame de la cuenca en estudio como cociente entre los valores anuales de derrame (fuente: SSRH) y de lluvia media areal. Los valores calculados se muestran en la Tabla N° 9.6.

Tabla N° 9.6: Valores del coeficiente de derrame anual en la cuenca del A° Feliciano.

Año Hidrológico	Lluvia media areal (mm)	Derrame anual (mm)	Coeficiente de Derrame	Año	Lluvia media areal (mm)	Derrame anual (mm)	Coeficiente de Derrame
1980/81	1.498	381	0,25	1994/95	1.099	133	0,12
1981/82	817	57	0,07	1995/96	1.074	191	0,18
1982/83	1.393	S/D	S/D	1996/97	818	28	0,03
1983/84	1.180	S/D	S/D	1997/98	1.974	764	0,39
1984/85	1.412	S/D	S/D	1998/99	1.033	120	0,12
1985/86	1.271	318	0,25	1999/00	1.027	166	0,16
1986/87	1.181	271	0,23	2000/01	1.307	309	0,24
1987/88	1.105	179	0,16	2001/02	1.541	635	0,41
1988/89	918	91	0,10	2002/03	1.821	760	0,42
1989/90	1.260	324	0,26	2003/04	896	65	0,07
1990/91	1.531	S/D	S/D	2004/05	1.498	657	0,44
1991/92	1.385	277	0,20	2005/06	992	224	0,23
1992/93	1.226	213	0,17	2006/07	1.225	440	0,36
1993/94	1.331	239	0,18				

Las lluvias anuales medias areales se calcularon a partir de los datos de precipitaciones diarias de las 23 estaciones pluviométricas disponibles. Para ello, se realizó un análisis de

consistencia, se rellenaron los datos mensuales faltantes de las series, aplicando el modelo Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (CHAC) (CEDEX, 2004) y se calcularon los valores medios areales aplicando polígonos de Thiessen. Las tareas desarrolladas se describen en el Anexo I.

Como es sabido, la escorrentía generada por una tormenta no depende sólo de la altura de lluvia sino también de otros factores, como la distribución espacio-temporal de la lluvia y la condición de humedad antecedente del suelo. Si bien es cierto que estos factores varían de una tormenta a otra, es de esperar que sus efectos tiendan a mitigarse si se evalúa la escorrentía al cabo de un año hidrológico, ya que los efectos de distinto signo sobre las tormentas individuales ocurridas en un año tienden a compensarse.

En la Figura N° 9.10 se representan gráficamente los valores del coeficiente de derrame en función de las precipitaciones anuales.

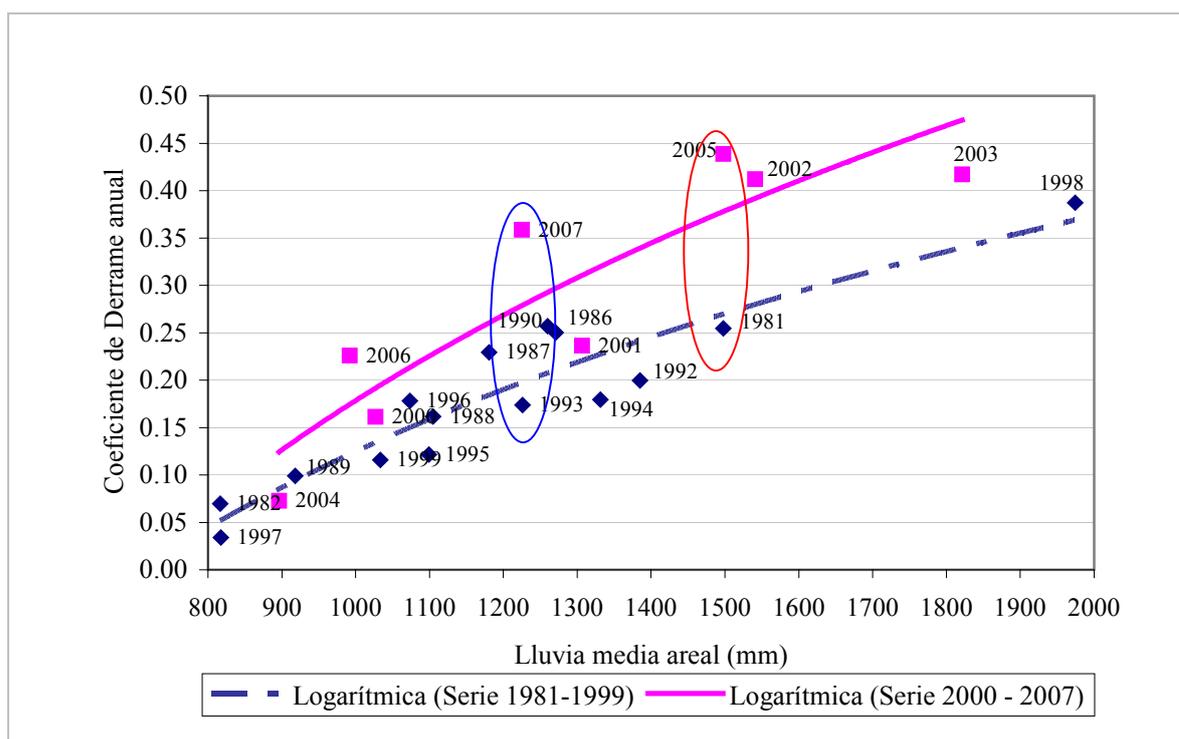


Figura N° 9.10: Coeficientes de derrame anual en función de las precipitaciones anuales en la cuenca en estudio

Para una mejor comprensión, en la figura se indican los años de ocurrencia de cada valor de coeficiente de derrame. Con una elipse roja se identifican dos valores del coeficiente que corresponden a un mismo valor de lluvia anual, de 1.498 mm. Se puede observar que el coeficiente pasó de 0,25 en 1980/81 a 0,44 en 2004/05. Con una elipse azul se identifican dos

valores del coeficiente que corresponden a un valor de lluvia de 1.225 mm. Se observa que el coeficiente pasó de 0,17 en 1992/93 a 0,36 en 2006/07.

Se ajustaron dos funciones teóricas a los puntos, una correspondiente al período 1981-1999 y otra al período 2000-2007. Se observa que la segunda función representa coeficientes de derrame mayores que la primera para las mismas precipitaciones, lo que indica **un aumento del potencial de escurrimiento de los suelos de la cuenca durante los últimos años**. Esto es coherente con los resultados obtenidos con el modelo para los distintos escenarios de usos/coberturas del suelo y la tormenta sintética.

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se investigaron los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos en la cuenca del A° Feliciano hasta Paso Medina, por medio de la aplicación del modelo AGWA-KINEROS2 en el entorno del SIG ArcView 3.2. El análisis se realizó para 2 escalas espaciales, la cuenca total (5541 km²) y la subcuenca 253 (138,4 km²), una de las más intervenidas.

Se elaboraron los datos básicos requeridos para la aplicación del modelo, como el MDE de la cuenca, el mapa de suelos con la clasificación FAO y mapas de usos/coberturas del suelo para tres escenarios (1986, 1997 y 2006), utilizando técnicas de SIG y teledetección. Para estos últimos, se procesaron 3 imágenes satelitales representativas de dichos escenarios y se aplicó una clasificación específica para esta Tesis.

Se implementó el modelo a la cuenca en estudio para cada uno de los escenarios, a partir de los datos básicos previamente elaborados.

Se calibró el modelo para cada uno de los escenarios. Para ello, se seleccionaron tres eventos precipitación-escorrentía observados en la cuenca en estudio, de similar magnitud, cada uno ocurrido durante uno de los tres escenarios. Los resultados obtenidos muestran una disminución de la conductividad hidráulica saturada del suelo media areal (KS) para los escenarios 1997 (1,74 mm/h) y 2006 (1,54 mm/h) respecto del escenario de 1986 (1,93 mm/h). La disminución de KS puede interpretarse físicamente como la consecuencia de un proceso de destrucción de la estructura de los suelos destinados a uso agrícola.

Se evaluaron los cambios de usos/coberturas del suelo entre 1986 y 2006. Se encontró un aumento de la superficie agrícola en detrimento de bosques y montes. Para la cuenca total, la disminución de la superficie de Bosque y Monte representa el 6,5 % de la superficie total de la cuenca. Para la subcuenca 253, la disminución representa el 14,7 % de la superficie de dicha subcuenca. Los resultados obtenidos indican que la mayor parte de los cambios se produjeron sobre suelos Vertisoles y Molisoles. Estos suelos se caracterizan por un alto contenido de arcillas, ocupan el 49,5% de la superficie total de la cuenca y se desarrollan en zonas próximas a la red de drenaje.

Se evaluaron los efectos de los cambios de usos/coberturas del suelo sobre la escorrentía directa y los caudales máximos. Para ello, se aplicó el modelo calibrado para cada escenario de usos/coberturas considerando como entrada una única tormenta sintética. Se encontró un aumento general de la escorrentía y de los caudales máximos al pasar del

escenario de 1986 al de 2006, lo que es coherente con la disminución de KS para este último. A la escala de la cuenca total, tanto la escorrentía como el caudal máximo aumentaron un 25%. A la escala de la subcuenca 253, la escorrentía aumentó un 55% y el caudal máximo, un 28%. Los aumentos de la escorrentía y del caudal máximo de la subcuenca 253 son mayores que para la cuenca total, debido a que la primera experimentó mayores cambios de usos/coberturas de suelos que la segunda.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el aumento de la superficie agrícola en detrimento de bosques y montes registrado en la cuenca en el período 1986/2006, ha originado un aumento tanto de la escorrentía como de los caudales máximos. Estos aumentos se explican principalmente por la baja a muy baja resistencia a la erosión de los suelos Vertisoles y Molisoles cuando son sometidos a uso agrícola. Este uso les provoca pérdida de materia orgánica, erosión y una destrucción de la estructura, originando una disminución de sus conductividades hidráulicas. En consecuencia, bajo uso agrícola, estos suelos tienen coeficientes de escorrentía próximos a la unidad después de un humedecimiento prolongado.

Para la subcuenca 253, además, se evaluaron los efectos para dos escenarios de usos/coberturas hipotéticos futuros, representativos de un mayor avance de la agricultura sobre los montes y praderas. Se encontró que a medida que aumenta la superficie agrícola, aumenta el coeficiente de escorrentía, tendiendo a un valor de equilibrio.

Se calcularon los valores anuales del coeficiente de derrame de la cuenca en estudio para las últimas décadas. Los resultados obtenidos indican un aumento del potencial de escurrimiento de los suelos en los últimos años, lo que es coherente con los resultados obtenidos de la simulación.

Se demostró la utilidad del modelo AGWA-KINEROS2, así como de las técnicas de SIG y teledetección empleadas, para evaluar los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo sobre la distribución espacio-temporal de la escorrentía en cuencas hidrográficas. Estas herramientas pueden ser utilizadas para planificar un aprovechamiento sustentable de los recursos suelo y agua en cuencas de la región.

Si se aplican métodos de diseño hidrológico basados en la transformación precipitación-escorrentía en cuencas con variación significativa de usos/coberturas del suelo, se recomienda considerar en la simulación los usos/coberturas del escenario futuro, proyectado a un plazo igual a la vida útil de la obra, similar a lo que es de práctica habitual en drenaje urbano. Si se aplican métodos basados en el análisis de frecuencia de caudales, se

recomienda verificar la homogeneidad de las series muestrales de caudales, ya que los efectos de cambios de usos/coberturas del suelo pueden originar una pérdida de homogeneidad de dichas series.

Finalmente, se recomienda profundizar los estudios con mayor cantidad de eventos e incorporar al análisis la pérdida de suelos por erosión, así como los efectos de la variabilidad y cambio climático.

REFERENCIAS

Abrahams A., Parsons A y Wainwright J., 1995. *Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnut Gulch, southern Arizona. Geomorphology* ISSN 0169-555X . Binghamton symposium in geomorphology N° 26, ETATS-UNIS (06/10/1995) 1995, vol. 13, n° 1-4: pp.37-48.

Aeroterra, INTA y Argeninta, 1995. *Atlas de Suelos de la República Argentina* [CD-ROM]:Windows 3.0, Buenos Aires, Argentina: INTA, ISBN. 987-95542-0-5.

Andréassian V., 2004. *Waters and forests: from historical controversy to scientific debate.* Journal of Hydrology 291:pp.1-27.

Bosch J. M. y Hewlett J. D., 1982. *A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.* Journal of Hydrology 55: pp. 3-23.

Brizuela A., Aguirre C. y Velasco I., 2007. *Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat para análisis multitemporal, En Teledetección – Hacia un mejor entrenamiento de la dinámica global y regional.* Memorias del Congreso de la Asociación Española de Teledetección (XII:2007: Mar del Palta) Editorial :Martin, Argentina.

Brooks R. H. y Corey A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No.3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Brown A., Podger G., Davidson A., Dowling T. y Zhang L., 2007. *Predicting the impact of plantation forestry on water users at local and regional scales: An example for the Murrumbidgee River Basin, Australia.* *Forest Ecology and Management*, Volume 251, Issues 1-2, 30 October 2007: pp 82-93

Burns I. S., Scott S., Levick L., Hernandez M., Goodrich D.C., Semmens D. J., Kepner W.G. y Miller S.N., 2004. *Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA)*, Tucson, Arizona, USA: A GIS based Hydrologic Modeling Tool. Documentation and User Manual.

Versión 1.2.4, <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/manual/AGWA> [citado en Noviembre del 2007]

Casermeiro J.R., De Petre A., Spahn E. y Valenti R. A., 2001. *Efecto del Desmonte sobre la Vegetación y el Suelo de un Bosque Nativo*, Revista de Investigación Agraria y Forestal, Universidad de La Rioja. España:ISSN 1131-7965, Vol. 10, Nº 2.

Cerana J, Wilson M., Pozzolo O, De Battista J.J., Rivarola S, Arias N, Banchemo A. y Sione S., 2005. *Determinación de las Condiciones Físicas de los Vertisoles, Orientadas al Manejo Sustentable con la Siembra Directa*, Seminario Internacional de Indicadores de Calidad de Suelo, Marcos Juarez

Chavez J.,1988. *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment 24:459-479.

Chow V. T., Maidment R. D. y Mays L. W., 1994. *Hidrología Aplicada*: Editorial McGraw Hill, Bogotá, Colombia, ISBN 958-600-171-7

Chuanguo Y., Zhongbo Y., Zhenchun H., Zhaohui L.y Shaofeng L., 2009. *Evaluation of Hydrological Responses to Land Use Change at Large Scale*, Environmental Science and Information Application Technology, vol. 1, pp. 336-339, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology.

Chuvieco E., 2000. *Fundamentos de Teledetección Espacial*, 3º edición revisada Editorial RIALP, Madrid, España, ISBN 84-321-3127-X

Centro De Estudios y Experimentación De Obras Públicas (CEDEX), 2004. *Manual del modelo Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (CHAC)*, Madrid, España: Ministerio de Fomento de España.

Committee on Hydrologic Impacts of Forest Management, National Research Council, 2008. *Hydrologic Effects of a Changing Forest Landscape*, The National Academies Press. ISBN-10: 0-3091-12108-6

Croke A., Merritt W. y Jakeman A., 2004. *A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments*. Journal of Hydrology 291: pp.115-131.

Driessen P., Deckers J., Spaargaren O. y Nachtergaele F., 2001. *Lecture notes on the major soils of the World*. World Soil Resources Reports 94. FAO, Rome.

Fairfield J. y Leymarie P.,1991.*Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research 30(6):pp1681-92.

Felicísimo A. M.,1994. *Modelos digitales del Terreno, Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*, Pentalfa Ediciones,
<http://www6.uniovi.es/~feli/LibrosSIG.html> [citado en Diciembre del 2007]

Fiener P. y Auerswald K. (2006,a). *Rotation Effects of Potato, Maize and Winter Wheat on Water Erosion from Cultivated Land. Chapter VII. Soil Management For Sustainability*. ISBN 3-923381 -52-2 US ISBN 1-59326-246-9

Fiener P. y Auerswald K. (2006,b). *Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff*. Ecological Engineering, 27: pp.208- 218.

Fullen M.A., 2007. *A comparison of runoff and erosion rates on bare and grassed loamy sand soils*. Soil Use and Management. Volume 7 Issue 3, British Society of Soil Science: pp. 136 – 138.

Hibbert A. R.,1967. *Forest treatment effects on water yield* .In Intl. Symp. on Forest Hydrol., pp. 527-543. See Sopper and Lull 1967. d'Hoore, J. D. 1961. "Influence de la mise en culture sur l'evolution des sols den la fores dense de basse et moyenne altitude." In Proceedings of Symposium on Humid Tropical Zone, Abidjan, 1959, pp. 49-58. Unesco.

Hillel D. ,1971. *Soil and water – physical principles and processes*. Academic Press, NY.: p.299

Iroumé A, Mayen O. y Huber A., 2006. *Runoff and peak flow responses to timber harvest and forest age in southern Chile*. Hydrological Processes 20:pp. 37-50

Kepner W., Semmens D., Hernandez M.y Goodrich D., 2008. *Evaluating hydrological response to forecasted land-use change*. Chapter 15. The North American Land Cover Summit (NALCS), Association of American Geographers (AAG).

Kinderknecht A., Papparotti O. y Saluzzio M., 2004. *Estudio de erosionabilidad de un suelo vertisol mediante el uso de un simulador de lluvia*. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos.

Kosmas C., Danalatos N., Cammeraat L.H., Chabart M., Diamantopoulos J., Farand R., Gutierrez L., Jacob A., Marques H., Martinez-Fernandez J., Mizara A., Moustakas N., Nicolau J.M., Oliveros C., Pinna G., Puddu R., Puigdefabregas J., Roxo M., Simao A.y Stamou G., 1997. *The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions*. CATENA, Volume 29, Issue 1: pp 45-59

Linsley R., Kohler M., Paulhus J. ,1977, *Hidrología para ingenieros*, Segunda Edición McGraw-Hill Latinoamericana, , Bogotá, ISBN 07-090914-8.

Maidment D. y Olivera F., 2000. *GIS Tools for HMS Modeling Support*, En: Maidment D., Djokic D. *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support*, California,USA :ESRI PRESS ,ISBN I-879IO2-80-3.

Matheussen B., Kirschbaum R., Goodman I., O'Donnell G. y Lettenmaier D., 2000. *Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada)*. Hydrological Processes. Volume 14 Issue 5: pp 867 - 885

Michelena R., Iurtia C., Vabruska F., Mon L. y Pittaluga A., 1989. *Degradación de los suelos en el norte de la Región Pampeana*. Proyecto de Agricultura conservacionista. EEA Pergamino. INTA Pergamino. Publicación Técnica N° 6: pp 135

Muñoz J. De D., Milera S., Romero C. y Brizuela A., 2003. *Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos*, Paraná, Argentina: Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNER.

Morin J., Lenzi L., Zucarelli V., Paoli C., Ceirano E. y Fabiano L. ,1989, *Aplicación del modelo "OCINE" en la cuenca del A° Feliciano*, Santa Fe, Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas-UNL N°031/89.

Morresi M. Del V., Zucarelli V. G. y Hammerly R., 2001.*Evaluación preliminar de la red pluviométrica en la cuenca del A° Feliciano (Entre Ríos, Argentina)*, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina.

Nash J. y Sutcliffe J., 1971. *River flow forecasting through conceptual models*. Journal of Hydrology 13:pp. 297-324

Niehoffa D., Fritscha U. y Bronstert A., 2002. *Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany*. Journal of Hydrology, Volume 267 , Issues 1-2 : pp 80-93.

Nini M. y Zucarelli V. G., 2004, *Caracterización de la cuenca del A° Feliciano (Entre Ríos, Argentina)*, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC) y Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS-AISS-IBG), 1999. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*, Italia: ISRIC, SICS-AISS-IBG, FAO, ISBN 92-5-304141-2.

Parlange J.Y., Lisle I., Braddock R.D. y Smith R.E.,1982. *The three-parameter infiltration equation*, Tucson, Arizona, USA : Soil Science , 133(6):pp 337-341.

PBNyAP, SAyDS, DB, 2005.*Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos*, Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas, Préstamo BIRF 4085-AR, Informe Nacional, Buenos Aires

PBNyAP, SAyDS, DB, 2006. *Primer Inventario Nacional De Bosques Nativos - Segunda Etapa -Inventario de Campo de la Región Espinal, Distritos Caldén y Ñandubay*, Informe Regional Espinal-Segunda Etapa, ANEXO II “Estado de Conservación del Distrito Ñandubay”: Coordinación de Bosques Nativos, Buenos Aires.

PBNyAP, SAyDS, DB, 2007. *Primer Inventario Nacional De Bosques Nativos - Segunda Etapa -Inventario de Campo de la Región Espinal, Distritos Caldén y Ñandubay*, Informe Regional Espinal-Segunda Etapa, Buenos Aires.

PBNyAP, SAyDS, DB. *Primer Inventario Nacional De Bosques Nativos*, Cartografía de Región Espinal <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=3028> [citado en Diciembre del 2008]

PBNyAP, SAyDS. *Mapa Forestal de la Región Espinal*, Cartografía de Región Espinal <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=316>, <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=3028> [citado en Diciembre del 2008]

SAyDS, Unidad Del Manejo Del Sistema De Evaluación Forestal, 1998-2001. *Cartografía y Superficie de Bosques Nativos de Argentina- Mapa Forestal de Entre Río*, http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/bosques/umsef/cartografia/mapa_entrerios.pdf [citado en Diciembre del 2008]

Semmens D.J., Goodrich D.C., Unkrich C.L., Smith R.E., Woolhiser D.A. y Miller S.N., 2003. *KINEROS2 and the AGWA Modeling Framework*, USDA Agricultural Research Service, Southwest Watershed Research Center, Tucson, AZ www.sahra.arizona.edu/unesco/shortcourses/chapters/Semmens_L6.pdf [citado en Marzo del 2009].

Tasi H., Wilson M., Schulz G., Undelangelo N. y Bedendo D., 2003. *Uso de la Tierra en el Área de Bosques Nativos de Entre Ríos*, Paraná, Argentina: Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNER.

U. S. Department Of Agriculture, 2003. *KINEROS2: A kinematic runoff and erosion model*, Tucson, Arizona, USA: Agricultural Research Service, Southwest Watershed Research Center, <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/> [citado en Marzo del 2009]

Woolhiser D. A., Smith R.E.y Goodrich D.C., 1990. *KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model Documentation and User Manual*, Tucson, Arizona, USA: U S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Zimmermann E. D.,1995. *Implicaciones antrópicas en los procesos de inundaciones en áreas llanas*, En: Jornadas Regionales Interdisciplinarias Sobre Ambiente. 1995:Santa Fe, Volúmenes de congreso. Santa Fe, Argentina.

Zimmermann E. D.,2000. *Adaptación del modelo de Onda cinemática a los sistemas hidrológicos de llanura* En: Congreso Nacional Del Agua. 2000: Termas de Río Hondo. Volúmenes de Congreso. Santiago del Estero, Argentina.

“Efectos hidrológicos del cambio de uso del suelo en el Litoral Argentino. Estudio de caso: cuenca del A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos)”

ANEXOS

ANEXO I: APLICACIÓN DEL MODELO CHAC

A partir de las series de precipitaciones diarias de las 23 estaciones pluviométricas disponibles, se calcularon las precipitaciones mensuales y anuales para cada año y estación.

Antes de la utilización de los datos, se procedió a verificar la consistencia de los mismos y a rellenar datos faltantes. Para ello, se aplicó del modelo Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas “CHAC” (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, 2004). El programa aplicado es de libre distribución y puede descargarse de Internet en la dirección <http://hercules.cedex.es/chac>

El período de estudio totaliza 27 años, va desde 1980/81 al 2006/07 y el inicio del año hidrológico considerado es el mes de septiembre.

Se describe a continuación las tareas realizadas con el modelo CHAC.

1) Análisis de consistencia

Para valorar la consistencia de una serie temporal en función de otra de referencia se aplica el método de Dobles Acumuladas. Su aplicación se basa en graficar los valores acumulados de cada una de las series para un período de tiempo común, en función de los valores acumulados de la estación de referencia. Cada punto graficado corresponde a un año de registro, conformado por la suma de todos los valores mensuales.

Cuando no hay una estación fiable para adoptar de referencia, el CHAC permite calcularla como la media de un grupo de estaciones. Admitiendo la hipótesis que la serie de las medias de un grupo de registros es poco sensible a los cambios en los registros individuales debido a la compensación de errores entre sí, se conforma la serie de referencia con los valores medios de un grupo de estaciones.

En este caso se conformaron 2 grupos de estaciones, uno con las ubicadas en la cuenca alta y otro en el resto, como se puede observar en la Figura N° 1.1.

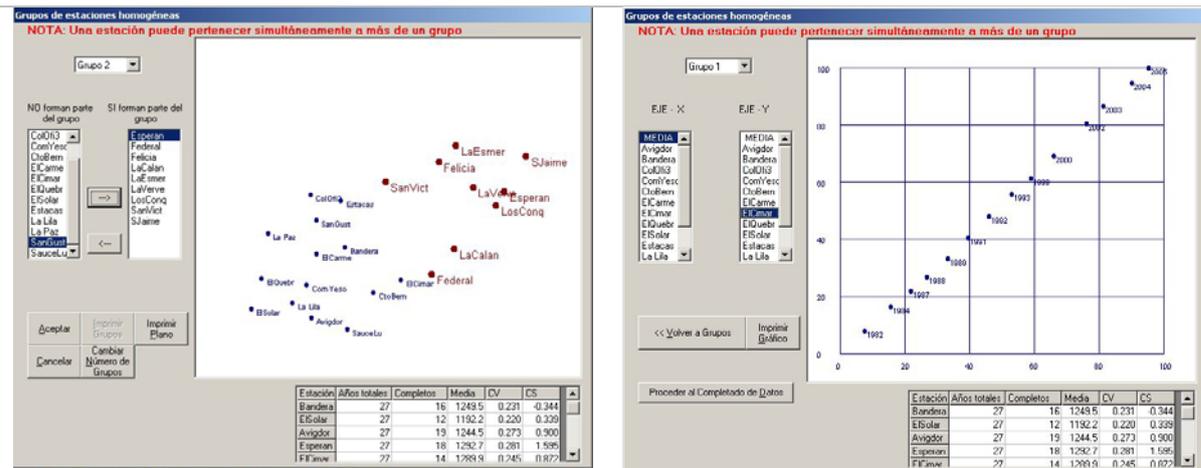


Figura N° 1.1: Vista del método de dobles acumuladas en el CHAC.

Si la relación entre las series es estable, es decir a los incrementos de una corresponden los proporcionales en la referencia, la representación gráfica será una línea recta, en este caso se dice que la serie es “homogénea”.

Si se encuentran quiebres en la pendiente, indica que se han producido errores sistemáticos en los datos, cambios en las condiciones de medición, instrumentos, etc, se dice entonces que hay “inconsistencia sistemática”

Si se encuentran saltos entre las rectas con la misma pendiente, esto se debe a lecturas erróneas, fallos en los medidores etc., se dice en este caso que hay “inconsistencia puntual”.

En los casos de las 23 estaciones no se detectaron las inconsistencias señaladas, por lo que se continuó el trabajo con las series originales.

2) Rellenamiento de datos faltantes

Ante la falta de datos mensuales en algunas estaciones, se procedió al relleno de las series a partir de un modelo de regresión bivariado con estacionarización previa mensual de las series de datos (CORMUL).

El completado se hace sobre la serie de datos de precipitaciones mensuales y con ella el valor anual.

Las estaciones seleccionadas son aquellas que tienen más de cinco datos en cada uno de los doce meses en el período seleccionado, se seleccionaron todas.

La elección de la pareja de estaciones que va a ser utilizada para el completado de cada una de las lagunas de una estación dada se basa en considerar un umbral mínimo del coeficiente de correlación múltiple ponderado según la expresión de la matriz de priorización.

En las Tablas N° 3.1 y N° 3.2 se muestran los estadísticos y en las Figuras N° 1.1 y N° 1.2 los cronogramas de las series de datos original y completada. En la Tabla N° 1.2 se puede

observar que la serie de la estación Yeso sólo completó 6 años, por lo que se tomó la decisión de eliminar la estación por falta de datos, quedando la serie con 22 estaciones para los estudios posteriores. En las Tablas N° 1.3 y N° 1.4 se muestran los archivos LEMA.

Tabla N° 1.1: Estadísticos de la serie de precipitación anual original para cada estación.

Estación	Años totales	Años completos	Media	CV	CS
Feliciano	27	21	1329	0.303	1.281
Banderas	27	12	1250	0.231	-0.344
El Solar	27	12	1192	0.220	0.339
Avigdor	27	19	1244	0.273	0.900
Esperanza	27	18	1293	0.281	1.595
El Cimarrón	27	14	1290	0.245	0.872
El Carmen	27	15	1391	0.284	-0.067
El Quebracho	27	7	1260	0.203	0.384
Estacas	27	10	1283	0.235	1.541
La Lila	27	17	1250	0.242	0.400
La Esmeralda	27	9	1094	0.181	-0.185
La Verbena	27	8	1277	0.257	-0.325
La Calandria	27	12	1294	0.288	0.133
San Gustavo	27	16	1418	0.224	-0.046
Com. Yeso	27	6	1259	0.260	0.487
Cto. Bernardi	27	9	1225	0.248	0.129
Federal	27	12	1285	0.228	-0.121
Los Conquistadores	27	11	1198	0.191	0.087
Sauce de Luna	27	7	1296	0.301	0.678
San Víctor	27	8	1232	0.397	0.945
San Jaime	27	13	1449	0.198	0.095
Col. Oficial N°3	27	7	1139	0.276	-0.736
La Paz	27	7	1495	0.159	0.490

Tabla N° 1.2: Estadísticos de la serie de precipitación anual completada para cada estación.

Estación	Años totales	Años completos	Media	CV	CS
Feliciano	27	27	1322	0.279	1.339
Banderas	27	27	1245	0.248	0.254
El Solar	27	25	1114	0.234	0.530
Avigdor	27	27	1176	0.290	0.773
Esperanza	27	27	1359	0.259	1.093
El Cimarrón	27	27	1227	0.252	0.462
El Carmen	27	27	1335	0.238	0.381
El Quebracho	27	26	1234	0.216	0.220
Estacas	27	26	1238	0.239	0.812
La Lila	27	27	1181	0.239	0.491
La Esmeralda	27	27	1202	0.275	0.740
La Verbena	27	27	1204	0.229	0.721
La Calandria	27	27	1258	0.250	0.396
San Gustavo	27	27	1247	0.280	0.346
Com. Yeso	27	6	1259	0.260	0.487
Cto. Bernardi	27	26	1205	0.229	-0.213
Federal	27	27	1318	0.269	0.566
Los Conquistadores	27	21	1178	0.187	-0.180
Sauce de Luna	27	24	1239	0.240	0.597
San Victor	27	16	1171	0.357	0.930
San Jaime	27	27	1406	0.242	0.652
Col. Oficial N°3	27	18	1228	0.224	-0.309
La Paz	27	19	1362	0.232	-0.104

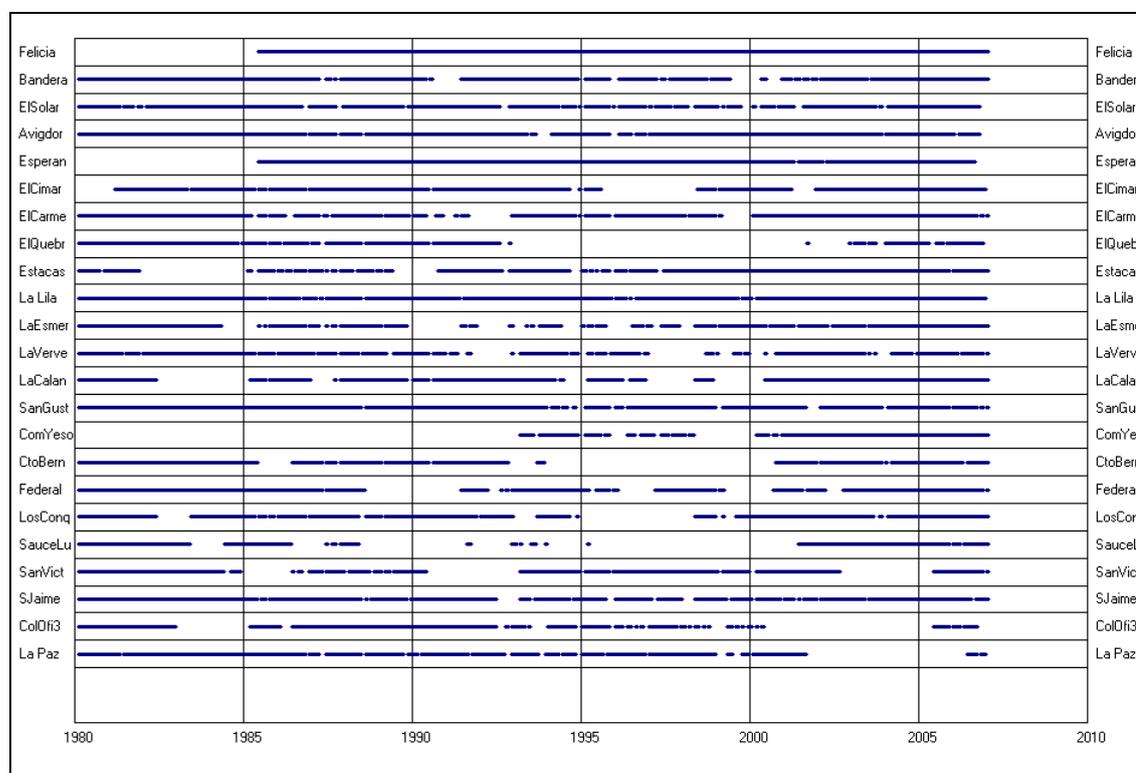


Figura N° 1.2: Cronograma generado por el CHAC para la serie original.

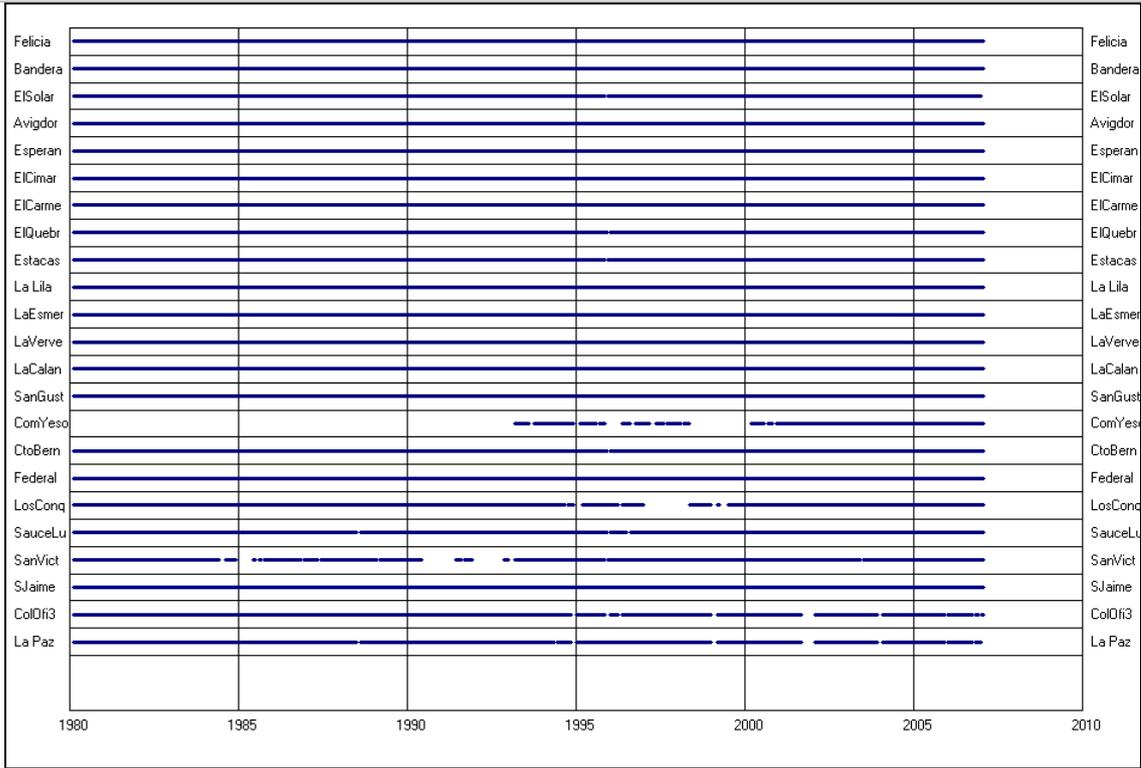


Figura N° 1.3: Cronograma generado por el CHAC para la serie completada.

Tabla N° 1.3: Archivo LEMA de la serie dato original (primer pagina).

Proyecto: Precipitaciones mensuales

Series temporales

Estaciones meteorológicas. Precipitación total mensual.

XUTM	YUTM	Indic.	Tipo	Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Annual
5620102	6638518	Felicia	PMT	1980/81	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1981/82	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1982/83	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1983/84	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1984/85	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1985/86	-100	-100	-100	-100	91.5	204.5	138.5	453.5	298.5	120	28.5	44	-100
5620102	6638518	Felicia	PMT	1986/87	89	115.5	318.5	64.7	152.5	36	212.5	118	88.5	3	109	102	1409.2
5620102	6638518	Felicia	PMT	1987/88	31	33	115.5	50.5	695	13.5	139.5	38.5	25.5	19	4.5	52.7	1218.2
5620102	6638518	Felicia	PMT	1988/89	82.8	54.5	24.5	133	16.5	2	108	226	25	35	33	167	907.3
5620102	6638518	Felicia	PMT	1989/90	9.5	38	109.5	95.5	35	216.5	369	215	24.5	13.5	18	38	1182
5620102	6638518	Felicia	PMT	1990/91	51.5	274	134.5	236.5	159	22	107	276	82	180	98	26	1646.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	1991/92	38	105	53.5	314.5	225.5	164.5	171.5	411	119	45	43	15.5	1706
5620102	6638518	Felicia	PMT	1992/93	81	66.5	132	225.5	319	34	90	251	125	5.5	22	6.5	1358
5620102	6638518	Felicia	PMT	1993/94	8	325.5	192	102	42.5	165	88.5	85.5	64.5	16.5	30	92	1212
5620102	6638518	Felicia	PMT	1994/95	82.5	193	94	114	103	210	184	87.5	108	14.5	38.5	12.5	1241.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	1995/96	6.5	131.5	64.5	62	220.5	140.5	122.5	223	18.5	2	3.5	12	1007
5620102	6638518	Felicia	PMT	1996/97	48.5	107	178.5	37	74.5	136	46.5	119.5	12.5	25.5	29	40	854.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	1997/98	54	198	216.5	314.5	454.5	229	408.5	182	50.5	162.5	52.5	105	2427.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	1998/99	76.5	34.5	49.5	183.5	25.5	187.5	114.5	104	56.5	75	59	1.5	967.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	1999/00	4.5	68	15	90	125.5	54.5	346	105	188	38.5	51.5	72.5	1159
5620102	6638518	Felicia	PMT	2000/01	95	119.5	131	123.5	405	7	85	105	23.5	149.5	6.5	98	1348.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	2001/02	153	248	168	88.5	76	20.5	209.5	381	80.5	26	132	43	1626
5620102	6638518	Felicia	PMT	2002/03	165	88	186	471.5	68.5	143.5	389	370.5	115	24	17	58	2096
5620102	6638518	Felicia	PMT	2003/04	53.5	161	189	250.5	26.5	56.5	69.5	137.6	21.6	24	6	3.8	999.5
5620102	6638518	Felicia	PMT	2004/05	71.5	75.5	174.6	154.5	220.5	109.5	215.5	204	113.5	133.5	25	45.5	1543.1
5620102	6638518	Felicia	PMT	2005/06	47.5	38	81.5	237.5	46.5	73	69.5	99	5.5	208.3	10.2	17.7	934.2
5620102	6638518	Felicia	PMT	2006/07	41	10.5	203	38.5	189	86	214.5	155	29	60.7	4.5	24.5	1056.2

Proyecto: Precipitaciones mensuales

Series temporales

Completado. Precipitación total mensual (mm)

XUTM	YUTM	Indic.	Tipo	Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Anual
5620102	6638518	Felicia	PMC	1980/81	46.2	168.4	172.1	172.3	81.5	239.3	90.7	143.7	53.8	58	27	17.6	1270.4
5620102	6638518	Felicia	PMC	1981/82	17.7	68.5	121.7	181.2	7.5	75.1	50	159.1	44.4	44.9	15.8	59.8	845.7
5620102	6638518	Felicia	PMC	1982/83	153.2	0	108.7	51.6	191.1	159	122.8	91	302.7	36.1	86	9.5	1311.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1983/84	71.1	126.8	139.6	4.7	268.8	133.7	94.1	206	66.6	21.3	37.2	22.2	1192.1
5620102	6638518	Felicia	PMC	1984/85	88.3	153	57.9	94.2	34.2	142.2	110.2	209	119.5	39.6	92	67.5	1207.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1985/86	54.8	86.6	103.3	90.7	91.5	204.5	138.5	453.5	298.5	120	28.5	44	1714.4
5620102	6638518	Felicia	PMC	1986/87	89	115.5	318.5	64.7	152.5	36	212.5	118	88.5	3	109	102	1409.2
5620102	6638518	Felicia	PMC	1987/88	31	33	115.5	50.5	695	13.5	139.5	38.5	25.5	19	4.5	52.7	1218.2
5620102	6638518	Felicia	PMC	1988/89	82.8	54.5	24.5	133	16.5	2	108	226	25	35	33	167	907.3
5620102	6638518	Felicia	PMC	1989/90	9.5	38	109.5	95.5	35	216.5	369	215	24.5	13.5	18	38	1182
5620102	6638518	Felicia	PMC	1990/91	51.5	274	134.5	236.5	159	22	107	276	82	180	98	26	1646.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1991/92	38	105	53.5	314.5	225.5	164.5	171.5	411	119	45	43	15.5	1706
5620102	6638518	Felicia	PMC	1992/93	81	66.5	132	225.5	319	34	90	251	125	5.5	22	6.5	1358
5620102	6638518	Felicia	PMC	1993/94	8	325.5	192	102	42.5	165	88.5	85.5	64.5	16.5	30	92	1212
5620102	6638518	Felicia	PMC	1994/95	82.5	193	94	114	103	210	184	87.5	108	14.5	38.5	12.5	1241.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1995/96	6.5	131.5	64.5	62	220.5	140.5	122.5	223	18.5	2	3.5	12	1007
5620102	6638518	Felicia	PMC	1996/97	48.5	107	178.5	37	74.5	136	46.5	119.5	12.5	25.5	29	40	854.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1997/98	54	198	216.5	314.5	454.5	229	408.5	182	50.5	162.5	52.5	105	2427.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1998/99	76.5	34.5	49.5	183.5	25.5	187.5	114.5	104	56.5	75	59	1.5	967.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	1999/00	4.5	68	15	90	125.5	54.5	346	105	188	38.5	51.5	72.5	1159
5620102	6638518	Felicia	PMC	2000/01	95	119.5	131	123.5	405	7	85	105	23.5	149.5	6.5	98	1348.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	2001/02	153	248	168	88.5	76	20.5	209.5	381	80.5	26	132	43	1626
5620102	6638518	Felicia	PMC	2002/03	165	88	186	471.5	68.5	143.5	389	370.5	115	24	17	58	2096
5620102	6638518	Felicia	PMC	2003/04	53.5	161	189	250.5	26.5	56.5	69.5	137.6	21.6	24	6	3.8	999.5
5620102	6638518	Felicia	PMC	2004/05	71.5	75.5	174.6	154.5	220.5	109.5	215.5	204	113.5	133.5	25	45.5	1543.1
5620102	6638518	Felicia	PMC	2005/06	47.5	38	81.5	237.5	46.5	73	69.5	99	5.5	208.3	10.2	17.7	934.2
5620102	6638518	Felicia	PMC	2006/07	41	10.5	203	38.5	189	86	214.5	155	29	60.7	4.5	24.5	1056.2

3. Distribución espacial (Thiessen)

Una vez obtenidos los valores de precipitación anual para cada estación, se calcularon las precipitaciones anuales medias areales para la cuenca. Para ello, se aplicó el método de Polígonos de Thiessen.

El trabajo de obtención de los polígonos Thiessen se realizó con una extensión de AcrView, "Create Thiessen Polygons V2.6", calculándose para cada año los pesos correspondientes a cada estación, según que estaciones tenían datos completos.

Son 19 las estaciones que intervienen con algún polígono en el promedio areal, como se puede observar en la Figura N° 1.4, ya que las estaciones El Solar, Sauce de Luna y Colonia Oficial N° 3 se ubican lejos y no tienen peso sobre la cuenca en estudio.

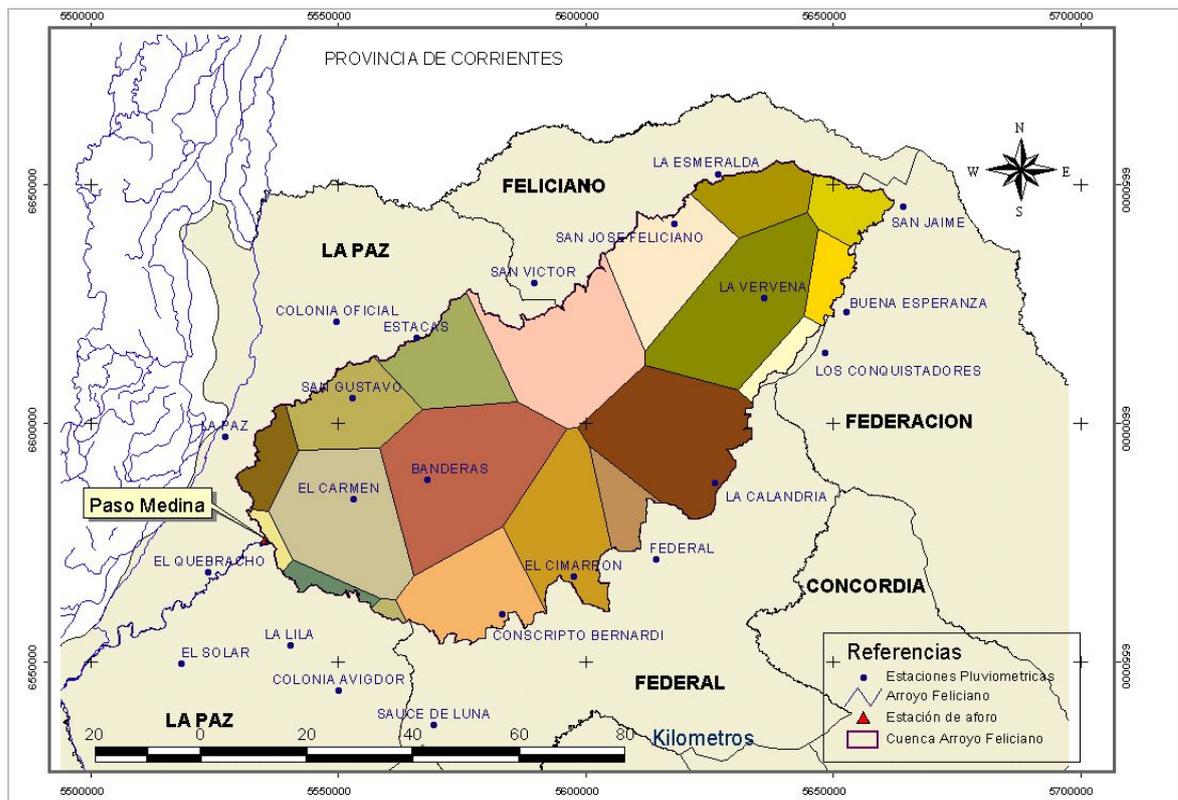


Figura N° 1.4: Mapa de los Polígonos Thiessen en la cuenca del A° Feliciano

En la Tabla N° 1.4 se muestran los valores de las precipitaciones anuales para cada año y estación y la precipitación anual media areal calculada.

Tabla N° 1.4: Cálculo de la serie de precipitaciones anuales medias areales.

AÑO	SERIE DE PRECIPITACION ANUAL CALCULADA (mm)																			PRECIP MEDIA AREAL (mm)
	Feliciano	Banderas	Avigdor	Esperanza	El Cimarrón	El Carmen	El Quebr	Estacas	La Esmeralda	La Verbena	La Calandria	San Gustavo	La Lila	Federal	Los Conquis.	Cto Bernardi	San Victor	San Jaime	La Paz	
1980/81	1307	1580	1354	1408	1656	1747	1485	1459	1226	1388	1597	1760	1229	1589	1090	1349	1294	1535	1695	1498
1981/82	1058	785	887	1023	722	754	1018	654	758	979	778	779	820	861	880	833	672	1010	962	817
1982/83	1393	1348	1280	1494	1428	1436	1301	1232	1399	1460	1220	1481	1406	1401	1407	1411	1394	1812	1484	1393
1983/84	1142	1189	1258	1421	1258	1081	1011	1309	1039	776	1273	1418	1357	1586	1240	1264	1176	1356	1248	1180
1984/85	1174	1696	1256	1277	1566	1647	1526	1358	996	984	1427	1613	1209	1640	1339	1545	-100	1305	1511	1412
1985/86	1719	1180	1260	1681	1288	1387	1303	1230	1369	970	1049	1391	1140	1213	1462	1096	-100	1508	1434	1271
1986/87	1409	1025	946	1413	1071	1186	1251	1211	1417	1318	911	1117	1186	1156	1169	1182	-100	1562	1212	1181
1987/88	1218	1021	998	1218	973	1124	1375	1223	1110	1177	1052	1090	1165	956	1116	984	-100	1184	1094	1105
1988/89	907	1122	726	907	876	977	833	740	1024	889	963	814	755	1043	804	950	696	1055	-100	918
1989/90	1182	1243	1122	1187	1152	1296	1340	1105	1508	1177	1393	1390	953	1216	1198	1277	-100	1489	1533	1260
1990/91	1647	1721	1410	1647	1050	1698	1258	1455	1689	1416	1509	1502	1248	1411	1484	1524	-100	1837	1444	1531
1991/92	1706	1358	1002	1693	1340	1163	1015	1314	1354	1360	1532	1245	1009	1833	1235	1094	-100	1649	1378	1385
1992/93	1358	1227	1106	1358	1368	1263	1021	1080	1246	1076	1204	1138	1101	1431	1032	1233	-100	1446	1285	1226
1993/94	1212	1451	1217	1180	1412	1448	1273	1201	1059	1441	1368	1227	1199	1341	1214	1311	-100	1303	1293	1331
1994/95	1242	1061	1040	1232	1097	1268	1065	1073	820	967	1330	849	1184	1092	-100	1241	938	1065	-100	1099
1995/96	1007	1014	1018	1007	1161	1299	-100	-100	731	1205	969	1086	1019	1114	-100	-100	-100	1081	943	1074
1996/97	855	721	578	855	628	925	731	1041	822	1058	774	673	695	771	-100	731	678	1141	692	818
1997/98	2428	1915	1933	2377	1592	2071	1772	1967	2017	1911	1877	1850	1775	2214	-100	1607	2206	2372	1883	1974
1998/99	968	1029	869	1260	1071	1166	1049	1023	966	980	1191	860	912	919	-100	934	1027	866	-100	1033
1999/00	1159	950	1023	1100	990	979	1110	1086	1188	1042	1212	925	1048	1049	-100	958	733	1580	-100	1027
2000/01	1349	1256	1065	1349	1420	1632	1419	1310	1111	1263	1234	1224	1257	1309	1230	1350	1128	1565	1209	1307
2001/02	1626	1503	1500	1644	1454	1623	1237	1373	1806	1623	1646	1425	1665	1791	1354	1407	1407	1583	-100	1541
2002/03	2096	1495	2033	2105	2063	1889	1724	1996	1685	1682	1936	1990	1708	1762	1579	1697	1769	1860	1952	1821
2003/04	1000	798	1045	1000	1098	907	857	961	903	856	851	908	956	1026	798	669	-100	850	-100	896
2004/05	1543	1582	1547	1543	1443	1496	1652	1487	1273	1415	1604	1704	1632	1649	1161	1510	1347	1437	1625	1498
2005/06	934	911	704	945	931	1232	1136	1227	897	985	930	957	906	863	1099	882	969	1151	-100	992
2006/07	1056	1440	1587	1372	1022	1365	1337	1079	1040	1120	1124	1250	1369	1354	853	1300	1310	1369	-100	1225

ANEXO II: PRIMER INVENTARIO NACIONAL DE BOSQUES NATIVOS

En el año 1998, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) comenzó con la elaboración del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos, en el marco del Proyecto Bosques Nativos y Áreas Protegidas (PBNyAP) - Préstamo BIRF 4085 AR, operación acordada por el Gobierno Nacional con el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF).

La finalidad del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos fue disponer de información confiable sobre la ubicación y extensión de los bosques nativos presentes en la Argentina.

La Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF) realizó la cartografía correspondiente a las regiones forestales, como así también la determinación de la superficie boscosa nacional.

Con el fin de contar con información más detallada sobre el estado de los bosques nativos, dado el interés de los gobiernos Prov.les de esta región, la SAyDS realizó en una segunda etapa.

Como resultado de este Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos se confeccionaron distintos informes, según la etapa y zona de estudio, de los cuales se han utilizado en este trabajo los siguientes:

- a) Informe Nacional, Edición Diciembre 2005.
- b) Segunda Etapa -Inventario de Campo de la Región Espinal, Distritos Caldén y Ñandubay, Informe Regional Espinal-Segunda Etapa, Estado de Conservación del Distrito Ñandubay, Edición Diciembre 2006.
- c) Segunda Etapa -Inventario de Campo de la Región Espinal, Distritos Caldén y Ñandubay, Informe Regional Espinal-Segunda Etapa, Edición Febrero 2007.
- d) Cartografía de Región Espinal.

El Mapa Forestal de la Región del Espinal elaborado por la UMSEF se muestra en la Figura N° 2.1.

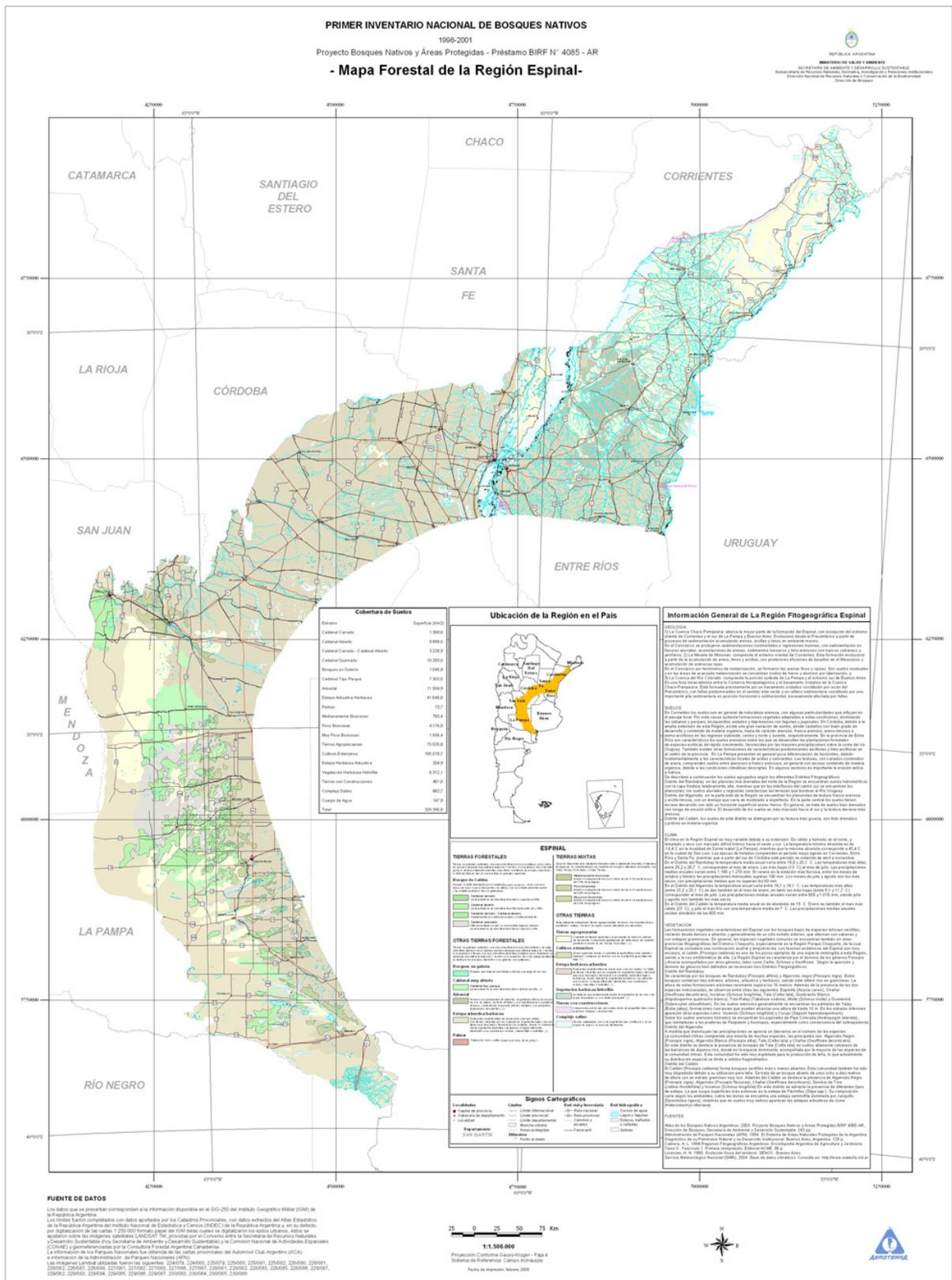


Figura N°2.1: Mapa Forestal de la Región Espinal (Fuente PBNyAP, SAyDS, Cartografía de Región Espinal).

ANEXO III: ÁREAS PROTEGIDAS EN LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

La Ley Prov. N° 8.961/95 creó en Entre Ríos un sistema de áreas protegidas, en las cuales están incluidas áreas de jurisdicciones nacional, Prov.I, municipal y privada, alcanzando las 56700 hectáreas (Dirección de Flora y Fauna del Gobierno de Entre Ríos), que sólo representan el 0,2% de la superficie original del Espinal entrerriano. En la Prov. de Corrientes no hay ningún área protegida declarada en este sector, como se puede observar en la Figura N° 3.1.

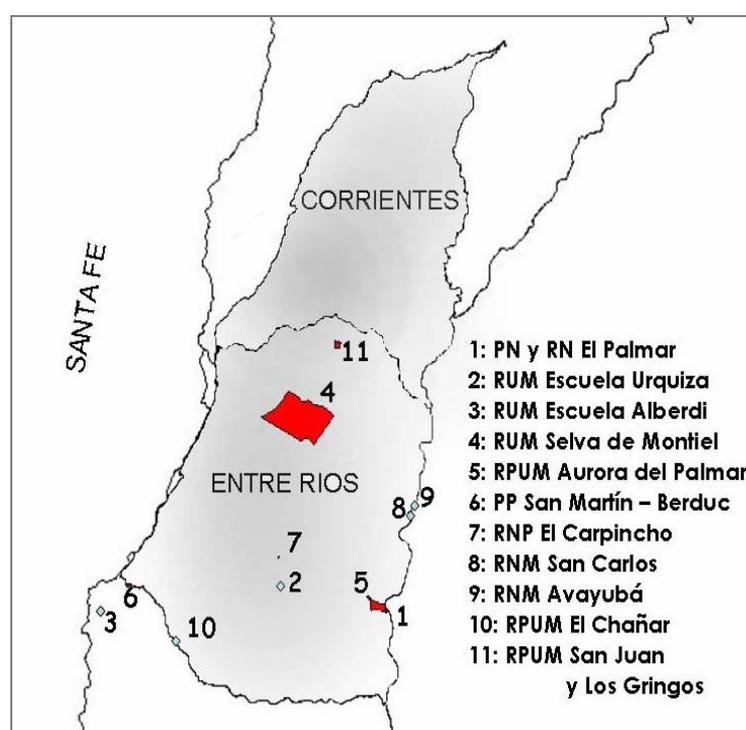


Figura N° 3.1: Lista y ubicación de las áreas protegidas del Distrito del Ñandubay (Fuente: PBNyAP , SAyDS, DB Informe Regional Espinal- Segunda Etapa- Anexo II)

Nota: PN: Parque Nacional, RN: Reserva Nacional, RUM: Reserva de Usos Múltiples, RPUM: Reserva Privada de Usos Múltiples, PP: Parque Prov.I, RNP: Reserva Natural Privada, RNM: Reserva Natural Municipal. Los rombos señalan las áreas protegidas menores a 100 hectáreas.

En la Figura N° 3.1 se puede ver que la mayor Reserva de Usos Múltiples Prov.I es la llamada **Selva de Montiel**, creada por Ley Prov. N° 9.706/06. Comprende una superficie aproximada de 70.000 hectáreas de terrenos privados ubicados en la estancia “El Rincón”,

cerca del paraje “El Gato”, a 45 Km. de la ciudad de Federal, dentro del Distrito Francisco Ramírez del Dpto. Federal .

Es una reserva privada, creada con el objetivo de preservar y proteger el bosque nativo denominado Selva de Montiel, su flora y fauna, mediante el desarrollo de actividades agroturísticas compatibles con la conservación. Está administrada por la Dirección de Producción Vegetal y Recursos Naturales de la Secretaría de Asuntos Agrarios.

Cuenta con tres especies de aves en peligro de extinción, como son el cardenal amarillo, capuchino pecho blanco y el ñandú. Con respecto a la fauna, todavía hay carpinchos, virachos, zorros, gato montés y yacarés. Como flora prevalecen el ñandubay, algarrobo, espinillo y las palmeras Caranday y Yatay.

A pesar que es un área protegida, hay denuncias de los vecinos que se ha producido desmonte sin autorización.

ANEXO IV: TASAS DE INFILTRACIÓN EN UN SUELO MOLISOL Y VERTISOL

Kinderknecht et al. (2004) investigaron los procesos de escurrimiento y erosión sobre dos clases de suelos, Molisol y Vertisol, mediante el uso de simuladores de lluvia sobre parcelas de escurrimiento de 25 m² ubicadas en el campo experimental del INTA en Paraná. Antes de realizar los ensayos, se hicieron roturaciones periódicas del suelo (cada 2 semanas durante 3 meses) con herramientas de labranza convencional para representar condiciones de uso agrícola y mantener las parcelas libres de vegetación.

Se aplicaron 3 lluvias sucesivas de 60, 30 y 15 minutos de duración, respectivamente, con una intensidad promedio de aproximadamente 150 mm/h. La segunda se aplicó 24 horas después de la primera y la tercera, 15 minutos después de la segunda.

Se midió el escurrimiento con un dispositivo aforador y el escurrimiento se recogió en un recipiente colector colocado en un pozo. Se secó a estufa (105 ° C) el agua escurrida, se pesó el sedimento y se determinó la pérdida de suelo generada por la lluvia artificial en la microparcela.

La tasa de infiltración varió para la secuencia de lluvias aplicadas como se muestra en las Figuras N° 4.1, N° 4.2 y N° 4.3, para la primera, segunda y tercera lluvia, respectivamente.

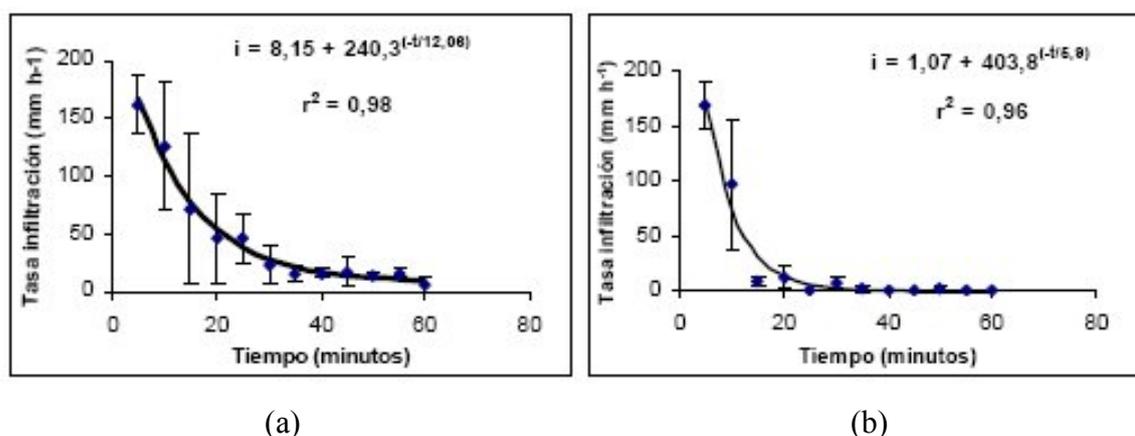


Figura N° 4.1: Tasas de infiltración en un suelo Molisol (a) y Vertisol (b) para la primer aplicación de lluvia (Fuente: Kinderknecht et al. (2004))

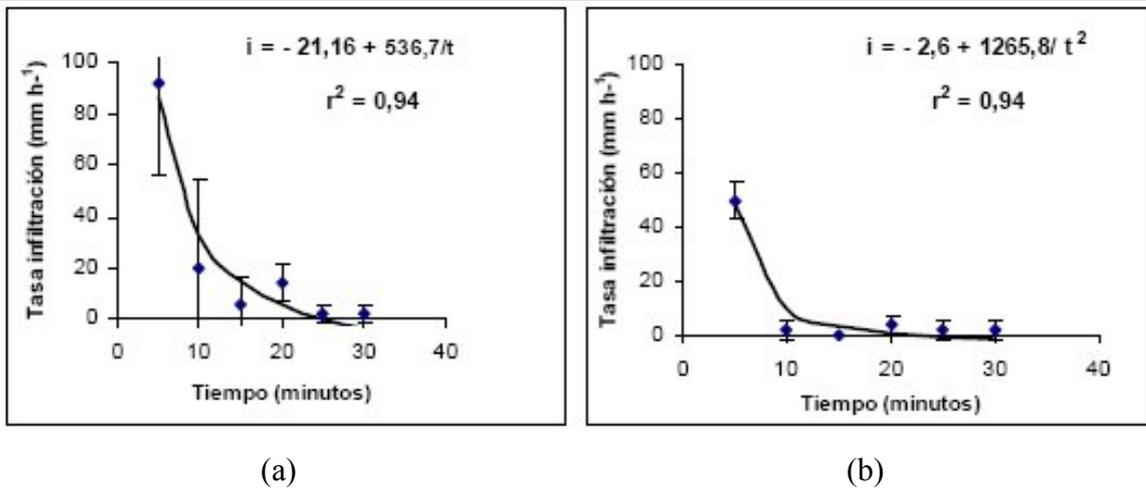


Figura N° 4.2: Tasas de infiltración en un suelo Molisol (a) y Vertisol (b) para la segunda aplicación de lluvia (Fuente: Kinderknecht et al. (2004))

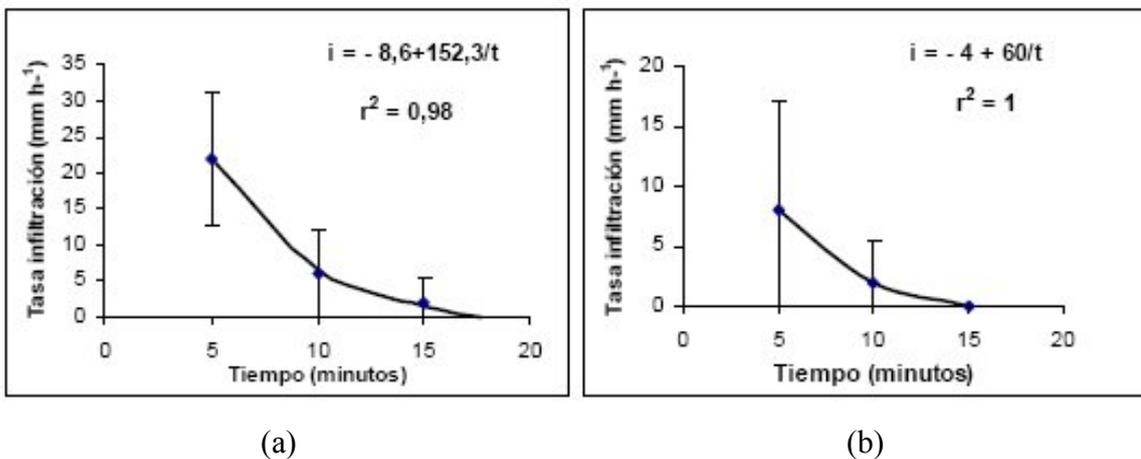


Figura N° 4.3: Tasas de infiltración en un suelo Molisol (a) y Vertisol (b) para la tercera aplicación de lluvia (Fuente: Kinderknecht et al. (2004))

ANEXO V: DELIMITACIÓN DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS

Las aplicaciones que se describen a continuación fueron presentadas en el IV Congreso de Cartografía realizado en Buenos Aires - Junio/2008.

Existen dos tipos de modelos de MDE, ambos fueron calculados en esta Tesis:

a) *Modelo vectorial*: los atributos del terreno se representan por medio de puntos, líneas o polígonos. En este caso se generó un modelo de puntos con coordenadas (x, y, z) con el software Surfer 8.

b) *Modelo raster*: los datos se interpretan con el valor medio de unidades elementales de superficie no nula, llamada celdas, que dividen el terreno con una distribución regular. En este caso se generó un mapa raster con una grilla de celdas de 30 x30 m. con el software ArcViewGIS 3.2

Los procedimientos aplicados se describen en el Capítulo 6.

A partir del MDE y luego de un proceso “paso a paso”, se obtuvieron los mapas raster con relleno de depresiones, de *dirección de flujo* y *de flujo acumulado*, aplicando el programa CRWR-Prepro (Maidment et al., 2000). El procedimiento aplicado se describe en el ítem 5.4.

Se presenta a continuación una comparación de los distintos los mapas de cuenca y subcuencas obtenidos con el programa mencionado previamente y con AGWA, para las opciones de los modelos SWAT y KINEROS2. En todos los casos se utilizaron como datos los mapas raster de *dirección de flujo* y *flujo acumulado* generados con el programa CRWR – Prepro y se consideraron los mismos valores de umbral para la desagregación en subcuencas.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura N° 5.1. Se puede observar como varían en cada caso la cantidad de subcuencas obtenidas, siendo siempre igual la cuenca resultante.

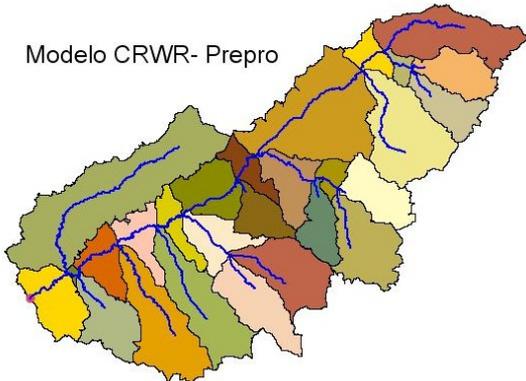
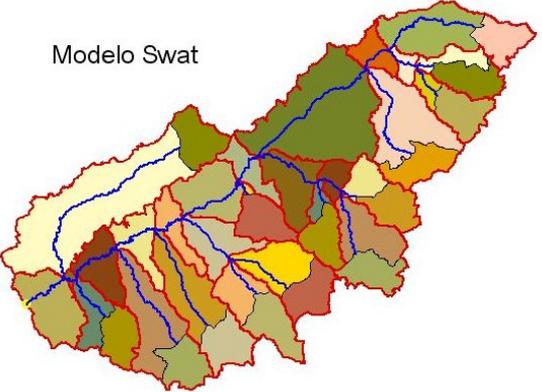
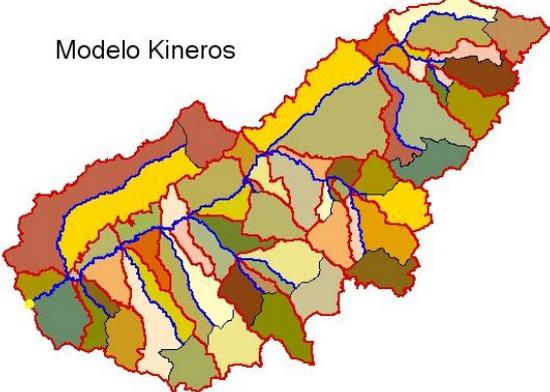
<p>Modelo CRWR- Prepro</p> 	<p>Modelo CRWR– Prepro (Center for Research in Water Resources)</p> <p>Total :27 Subcuencas</p>
<p>Modelo Swat</p> 	<p>Modelo AGWA - SWAT</p> <p>14 Cabeceras + 27 centrales</p> <p>Total :41 subcuencas</p>
<p>Modelo Kineros</p> 	<p>Modelo AGWA – KINEROS (KINEmatic Runoff and EROSion)</p> <p>14 Cabeceras + 27 centrales MI + 27 centrales MD</p> <p>Total : 68 Subcuencas</p>

Figura N° 5.1: Comparación de los mapas de subcuencas obtenidos con distintos modelos.

A partir de los procedimientos aplicados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) Para obtener un MDE que permita una buena representación planialtimétrica de cuencas con poca pendiente, es importante realizar determinadas intervenciones manuales. Éstas deben realizarse a conciencia y aprovechando las ventajas de trabajar en SIG, ya sea con datos de tipo vectorial o raster.
- b) La utilización en forma conjunta de varios Software como AutoCadMap 2000, ArcviewGIS y Surfer 8, hizo posible la confección final de un MDE en formato raster que

refleja de manera satisfactoria el relieve del terreno, minimizando los errores de captura de datos e interpolación. Esto requiere de paciencia y tiempo por parte del modelador.

c) Los métodos de delimitación automática de cuencas y subcuencas a partir del MDE tienen una gran ventaja en términos de tiempo y versatilidad respecto del método manual tradicional y permiten analizar distintas escalas espaciales de desagregación de la cuenca en forma rápida y sencilla.

d) Otra ventaja sustancial de los métodos automáticos respecto del método manual es que no sólo dan como resultado los mapas sino también las tablas de atributos geométricos extraídos automáticamente del MDE, tanto para las subcuencas como para los segmentos de canal.

e) El modelo CRWR– Prepro es más laborioso porque se hace paso a paso, pero permite en ellos agregar información adicional. En cambio, AGWA es más automático y no lo permite.

ANEXO VI: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EXISTENTES

Tabla N° 6.1: Equiparación Clases de Suelo SOIL TAXONOMY - FAO 1975, en la cuenca del A° Feliciano (Fuente Mabel Pazos)

SOIL TAXONOMY					FAO 1975		
SIMBC	ORDEN	SUBORDEN	GGRUPOS	SGRUPOS	GRUPO	UNIDAD	SIMBOL
AFtc-2	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Típico	Luvisol	Gléyico	Lg3
AFve-1	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Vertico	Luvisol	Vértico	Lg3
AFve-3	Alfisol	Acualf	Ocracualf	Vertico	Luvisol	Vértico	Lg3
ECTc-2	Entisol	Acuent	Haplacuent	Típico	Regosol	Gléyico	Re2
ICTc-1	Inceptisol	Acuept	Halacuept	Típico	Gleysol	Endosálico	Ge2
MCve-1	Molisol	Acuol	Argiacuol	Vertico	Phaeozem	Gléyico	Hg3
MIac-12	Molisol	Udol	Argiudol	Acuico	Phaeozem	Lúvico	HI2
MIve-7	Molisol	Udol	Argiudol	Vertico	Phaeozem	Lúvico	HI3
MJfv-2	Molisol	Udol	Hapludol	Fluventico	Phaeozem	Háplico	Hh2
VBag-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argico	Vertisol	Pélico	Vp3
VBay-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argiacuolico	Vertisol	Pélico	Vp3
VBay-2	Vertisol	Udert	Peludert	Argiacuolico	Vertisol	Pélico	Vp3
VBaz-1	Vertisol	Udert	Peludert	Argiudolico	Vertisol	Pélico	Vp3

Tabla N° 6.2: Ejemplo de la Tabla FAO_World para una unidad de suelo

FAO_World		
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
SNUM	Numero de suelo S/unidad de mapa	283
FAOSOIL	Nombre de la Unidad de Mapa	Vp1-3a
SU1	Unidad de suelo 1	Vp 3
PER1	Porcentaje del suelo 1	100
SU2	Unidad de suelo 2	
PER2	Porcentaje del suelo 2	
SU3	Unidad de suelo 3	
PER3	Porcentaje del suelo 3	
SU4	Unidad de suelo 4	
PER4	Porcentaje del suelo 4	
SU5	Unidad de suelo 5	
PER5	Porcentaje del suelo 5	
SU6	Unidad de suelo 6	
PER6	Porcentaje del suelo 6	
SU7	Unidad de suelo 7	
PER7	Porcentaje del suelo 7	
SU8	Unidad de suelo 8	
PER8	Porcentaje del suelo 8	

Tabla N° 6.3: Ejemplo de la Tabla FAO_ Propiedades para una unidad de suelo.

FAO Properties		
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
SOIL_UNIT	Unidad de suelo	VP 3
TEXTURE	Textura	C
SANDTOP	% de Arena superfic.	24.40
SANDSUB	% de Arena subsup.	22.40
SILTTOP	% de Limo superfic.	11.50
SILTSUB	% de Limo subsup.	10.90
CLAYTOP	% de Arcilla superfic.	64.20
CLAYSUB	% de Arcilla subsup.	66.70
PHWAT.TOP	PH en agua superfic	7.20
PHWAT.SUB	PH en agua subsuperfic	7.60
OCTOP	Carbono orgánico sup.	0.67
OCSUB	Carbono orgánico sub.	0.52
NTOP	Nitrógeno superfic.	0.14
NSUB	Nitrógeno subsup	0.04
BSTOP	Porcentaje	96.00
BSSUB	Porcentaje	97.00
CECTOP	cmol(+)/kg	50.20
CECSUB	cmol(+)/kg	52.30
CECCLAY.TOP	cmol(+)/kg	75.00
CECCLAY.SUB	cmol(+)/kg	75.00
CACO3TOP	Carbonato da calcio sup	1.20
CACO3.SUB	Carbonato da calcio sub.	3.20
BDTOP	Densidad de volumen	1.10
BDSUB	Densidad de volumen	1.20

Tabla N° 6.4: Ejemplo de la Tabla FAO_ Summ para una unidad de suelo

FAO Summ		
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
SOIL_UNIT	Unidad de suelo	Vp 3
TEXTURE	Textura	C
SAND_TOP	% de Arena superfic.	20
SAND_SUB	% de Arena subsup.	19
SILT_TOP	% de Limo superfic.	23
SILT_SUB	% de Limo subsup.	20
CLAY_TOP	% de Arcilla superfic.	57
CLAY_SUB	% de Arcilla subsup.	61
OC_TOP	Carbono orgánico sup.	1
OC_SUB	Carbono orgánico sub.	1
FRAG_TOP	Fragmento de roca superf.	5
FRAG_SUB	Fragmento de roca subsuperf.	5
DEPTH_TOP	Profundidad superficial	30
DEPTH_MAX	Profundidad máxima	125
AWC_TOP	Capacidad de agua disp. sup.	0.13
AWC_SUB	Capacidad de agua disp. subsup.	0.13
AWC_1_M	Capacidad de agua disp.	132
BD_TOP	Densidad de volumen sup	1.1
BD_SUB	Densidad de volumen subsup	1.2
POR_TOP	Porosidad superficial	58
POR_SUB	Porosidad subsuperficial	55

Tabla N° 6.5: Tabla Kin_lut.dbf

TEXTURE	KS	G	POR	SMAX	CV	SAND	SILT	CLAY	DIST	KFF
C	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.340
CBV	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.050
CEM	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.280
CIND	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.020
CL	2.300	259.0	0.464	0.840	0.940	32.00	34.00	34.00	0.240	0.390
COS	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.150
COSL	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.240
FB	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.050
FRAG	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.050
FS	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.200
FSL	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.350
G	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	27.00	23.00	50.00	0.160	0.150
GYP	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.050
HM	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.020
ICE	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
IND	0.300	100.0	0.200	0.300	0.200	0.00	0.00	0.00	0.000	0.250
L	13.000	108.0	0.463	0.940	0.400	42.00	39.00	19.00	0.250	0.420
LCOS	61.000	63.0	0.437	0.920	0.850	83.00	7.00	10.00	0.550	0.180
LFS	61.000	63.0	0.437	0.920	0.850	83.00	7.00	10.00	0.550	0.250
LS	61.000	63.0	0.437	0.920	0.850	83.00	7.00	10.00	0.550	0.230
LVFS	61.000	63.0	0.437	0.920	0.850	83.00	7.00	10.00	0.550	0.440
MUCK	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.020
PC	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.320
PEAT	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.020
S	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.180
SC	1.200	302.0	0.430	0.750	1.000	50.00	4.00	46.00	0.340	0.360
SCL	4.300	263.0	0.398	0.830	0.600	59.00	11.00	30.00	0.400	0.360
SI	3.000	260.0	0.450	0.920	0.550	8.00	81.00	11.00	0.130	0.430
SIC	0.900	375.0	0.479	0.880	0.920	9.00	45.00	46.00	0.150	0.310
SICL	1.500	345.0	0.471	0.920	0.480	12.00	54.00	34.00	0.180	0.400
SIL	6.800	203.0	0.501	0.970	0.500	23.00	61.00	16.00	0.230	0.490
SL	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.320
SPM	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.020
SR	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.330
UWB	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.020
VAR	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.550
VFS	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.460
VFSL	26.000	127.0	0.453	0.910	1.900	65.00	23.00	12.00	0.380	0.500
WB	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.020
MPT	0.600	407.0	0.475	0.810	0.500	27.00	23.00	50.00	0.160	0.020
COARSE	67.100	92.7	0.445	0.920	1.357	75.16	14.15	10.69	0.486	0.268
MEDIUM	9.056	205.7	0.463	0.917	0.738	36.57	42.98	20.45	0.272	0.416
FINE	0.824	382.8	0.470	0.818	0.610	27.02	25.41	47.57	0.181	0.345
D/SS	210.000	46.0	0.437	0.950	0.690	91.00	1.00	8.00	0.690	0.180
SALT	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.050
ROCK	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.020
GLACIER	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
WATER	0.000	0.0	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000

Tabla N° 6.6: Descripción de los parámetros de la Tabla Kin_lut.dbf

NOMBRE	DESCRIPCION
TEXTURA	Según Diagrama Triangular del USDA
Ks	Conductividad Hidráulica Saturada (mm/hr)
G	Tensión capilar (mm)
POR	Porosidad (cm ³ /cm ³)
SMAX	Máxima Saturación relativa
CV	Coefficiente de variación de Ks
SAND	Fracción de arena (0-100) (%)
SILT	Fracción de limo (0-100) (%)
CLAY	Fracción de arcilla (0-100) (%)
DIST	Distribución poros (pore size distribution index)
KFF	Factor K de USLE

ANEXO VII: CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA Y ATMOSFÉRICA

Tabla N° 7.1: Parámetros utilizados en la corrección de la imagen del 11/01/1986.

ORBITA: 226		FECHA: 01/11/1986		Sun elevation: 52.4		
PUNTO: 81		HORA: 13.17				
banda	Lmin	Lmax	Gains	Biases	Long. Media	ND ₀
1	-0.152	16.90	0.0668706	-0.152	0.4863	24
2	-0.284	33.30	0.1317020	-0.284	0.5706	10
3	-0.117	26.40	0.1039880	-0.117	0.6607	13
4	-0.151	22.10	0.0872588	-0.151	0.8382	16
5	-0.037	3.02	0.0119882	-0.037	1.677	3
7	-0.015	1.65	0.0065294	-0.015	2.223	1

Tabla N° 7.2: Parámetros utilizados en la corrección de la imagen del 30/03/1997.

ORBITA: 226		FECHA: 30/03/1997		Sun elevation: 38.6		
PUNTO: 81		HORA: 13.16				
banda	Lmin	Lmax	Gains	Biases	Long. Media	ND ₀
1	-0.152	19.30	0.0762824	-0.152	0.4863	12
2	-0.284	36.50	0.1442510	-0.284	0.5706	7
3	-0.117	26.40	0.1039880	-0.117	0.6607	8
4	-0.151	22.10	0.0872588	-0.151	0.8382	6
5	-0.037	3.02	0.0119882	-0.037	1.677	2
7	-0.015	1.65	0.0065294	-0.015	2.223	0

Tabla N° 7.3: Parámetros utilizados en la corrección de la imagen del 24/04/2006.

ORBITA: 226		FECHA: 24/04/2006		Sun elevation: 36		
PUNTO: 81		HORA: 13.5				
banda	Lmin	Lmax	Gains	Biases	Long. Media	ND ₀
1	-0.152	19.30	0.0762824	-0.152	0.4863	42
2	-0.284	36.50	0.1442510	-0.284	0.5706	14
3	-0.117	26.40	0.1039882	-0.117	0.6607	10
4	-0.151	22.10	0.0872588	-0.151	0.8382	7
5	-0.037	3.02	0.0119882	-0.037	1.677	2
7	-0.015	1.65	0.0065294	-0.015	2.223	1

ANEXO VIII: CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS EXISTENTES

En relación a los tipos de cobertura existente en la zona, se analizaron los siguientes trabajos antecedentes:

- “*Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos*”, realizado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS). Comprende informes de distintas etapas y zonas de estudio. Años 2005, 2006, 2007.
- “*Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos*”, realizado por J. Muñoz, S.Milera, C.Romero y A. Brizuela, investigadores de la UNER. Año 2003.

1. Clase de Coberturas definidas en el Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos

Para el “*Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos*”, la SAyDS adoptó la clasificación de las clases de coberturas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Programa de Evaluación de Recursos Forestales (FRA 2000), adaptándola al contexto argentino (Tabla N° 8.1).

Tabla N° 8.1: Clases de Cobertura según Clasificación FAO (Fuente: SAyDS, 2005).

Clase de Cobertura	Definición
Tierras Forestales	Tierra con una cubierta de copa (o su grado equivalente de espesura) de más del 20 % del área y una superficie superior a 10 hectáreas (ha). Los árboles deberían poder alcanzar una altura mínima de 7 metros (m) a su madurez in situ. Puede consistir ya sea en formaciones forestales cerradas, donde árboles de diversos tamaños y sotobosque cubren gran parte del terreno.
Otras tierras forestales	Estas abarcan ya sea tierras donde la cubierta de copa (o su grado de espesura equivalente) tiene entre 5 y 20 % de árboles capaces de alcanzar una altura de 7 m a su madurez in situ; o tierras con una cubierta de copa de más del 20 % (o su grado de espesura equivalente) en la que los árboles no son capaces de alcanzar una altura de 7 m a su madurez in situ (por ej. árboles enanos o achicados); o aquellas donde la cubierta arbustiva abarca más del 20 %.
Bosques rurales	Remanentes de bosque natural en un paisaje agrícola, menores a 1000 hectáreas.
Otras tierras	Tierras no clasificadas como forestales u otras tierras forestales especificadas más arriba. Incluye tierras agrícolas, praderas naturales y artificiales, terrenos con construcciones, tierras improductivas, etc.

Para realizar la identificación de las distintas clases de cobertura del distrito Ñandubay se utilizó información proveniente de la verificación a campo, datos del inventario y datos

satelitales provenientes de los sensores ópticos Landsat 5 TM, TERRA-ASTER y CBERS2-CCD, de distintos años del período 1997-2006.

La cobertura final se integró con las distintas capas temáticas del SIG 250 del IGM, INDEC y APN en un Sistema de Información Geográfica, con lo que se obtuvo la cartografía temática forestal.

Para el estudio de la vegetación de un área se pueden considerar distintos niveles de percepción de la heterogeneidad espacial y temporal de la misma, con sus correspondientes escalas de representación, según el nivel de detalle de la información disponible.

Por ejemplo para el caso de trabajar con las imágenes Landsat de resolución 30m se puede lograr un nivel 2 de percepción. Las diferencias observadas están generalmente relacionadas con la disposición general de las grandes zonas de utilización actual del suelo, que pueden clasificarse en tres categorías: forestal (más o menos densa), pastoril y agrícola.

Como resultado de la primera etapa del Inventario Nacional, en el año 2001 se elaboró un mapa forestal de la Provincia de Entre Ríos. El mismo se obtuvo a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales, principalmente Landsat 5 TM (años 1998 y 1999) (Figura N° 8.1). Las clases de esta figura no coinciden con las clases de la Tabla 6.2 que corresponde al informe de la Segunda Etapa (2006), donde se estudió más en detalle el Distrito Ñandubay.

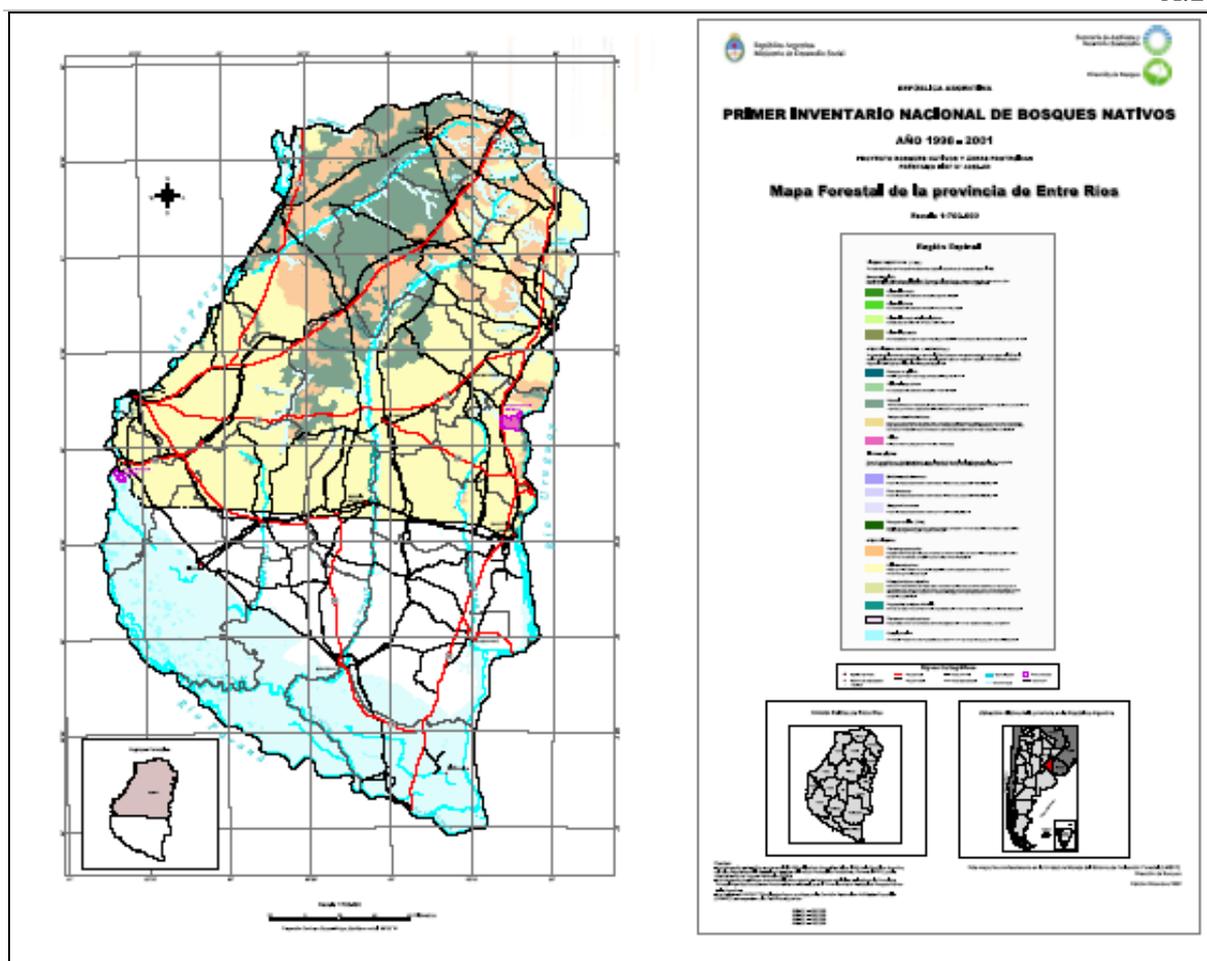


Figura N° 8.1: Mapa Forestal de la Provincia de Entre Ríos 2001 (Fuente SAyDS-UMSEF)

El Informe Regional Espinal –Segunda Etapa (2007) de la SAyDS presenta una tabla con los valores de superficie ocupadas por las distintas clases de cobertura de acuerdo a la clasificación FAO, para los niveles 1 y 2 de percepción correspondiente a los sectores de las dos Prov.s que ocupa el distrito Ñandubay, Entre Ríos y Corrientes.

A partir de dicha tabla se confeccionó la Tabla 8.2, donde solo se presentan los valores de superficie (en hectáreas y porcentaje) correspondiente a Entre Ríos.

Tabla N° 8.2: Superficies por clase de cobertura del Distrito Ñandubay en Entre Ríos
(Fuente: PBNyAP, SAyDS, DB Informe Regional Espinal-Segunda Etapa-2007)

Clase de Cobertura	Nivel 1	Nivel 2	Superficie (has)	Superficie (%)
Tierras forestales	Bosque de Ñandubay	Ñandubay y Espinillo	575.753	13,53%
		Ñandubay y Espinillo con otras especies	615.639	14,47%
	Bosque de transición	421	0,01%	
SUBTOTAL TIERRAS FORESTALES			1.191.813	28,01%
Otras tierras forestales	Ñandubay Tipo Parque		212.736	5,00%
	Arbustales		7.757	0,18%
	Bosque en Galería		208.943	4,91%
	Palmares		8.355	0,20%
SUBTOTAL OTRAS TIERRAS FORESTALES			437.791	10,29%
Otras Tierras	Pastizales		181.622	4,27%
	Cultivos		2.011.009	47,26%
	Vegetación herbácea hidrófila		160.200	3,76%
	Tierras con construcciones		21.563	0,51%
	Plantaciones forestales		201.073	4,73%
	Cuerpo de agua		48.525	1,14%
	Sin vegetación		1.853	0,04%
SUBTOTAL OTRAS TIERRAS FORESTALES			2.625.845	61,71%
TOTAL			4.255.449	100,00%

Se puede ver claramente que la mayor superficie corresponde a la clase “Cultivos” con un 47% y luego las clases de “Bosque de Ñandubay” (Ñandubay-Espinillo y Ñandubay-Espinillo con otras especies) que totalizan el 28%.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el “*Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos - Informe Regional Espinal-Segunda Etapa*”, las clases del Bosque de Ñandubay (Ñandubay-Espinillo y Ñandubay-Espinillo con otras especies) y Ñandubay Tipo Parque, son las clases de vegetación natural con mayor número de fragmentos, indicando procesos intensos de fragmentación del bosque, por las razones ya expresada anteriormente.

El fragmento de mayor tamaño de Bosque de Ñandubay se encuentra en Entre Ríos y más precisamente en la Cuenca del A° Feliciano.

Identificación

Dentro de la clase Tierras forestales, se observan confusiones entre la clase Ñandubay-Espinillo y la clase Ñandubay-Espinillo con otras especies. Estas confusiones pueden deberse

a que los datos satelitales utilizados dificultan la discriminación de ambas clases cuando existen arbustos en el estrato inferior de la clase Ñandubay-Espinillo o la presencia de agua en suelo. Además, la baja exactitud (66 %) de la clase Ñandubay-Espinillo resulta de la confusión con la clase Ñandubay tipo parque cuando los bosques presentan una baja cobertura arbórea y con la clase Arbustales debido a su composición específica similar.

En cuanto a las Otras tierras forestales, para la clase “Ñandubay tipo parque” se alcanzó una exactitud relativamente baja (70 %) presentando un error del 30 %. Esto se debe en primer término a la dificultad para discriminar esta clase de la clase Ñandubay-Espinillo cuando esta última presenta una formación menos densa y en segundo término a las confusiones con la clase Pastizales cuando la cobertura arbórea del bosque es muy baja. Principalmente para este último caso, sería posible mejorar su identificación utilizando datos de mayor resolución espacial (menor a 10 m) que permitan detectar individuos aislados.

Para la clase Arbustales el error fue del 89 % dado principalmente por las confusiones con la clase Ñandubay-Espinillo debido a que la tecnología utilizada dificulta la discriminación de esta clase

Con respecto a las Otras tierras, la clase Pastizales presentó una exactitud relativamente baja (71 %) debido a su confusión con la clase Ñandubay tipo parque. La clase Vegetación herbácea hidrófila obtuvo una exactitud del 78 %, confundiéndose con la clase Bosque en galería, debido principalmente a la asociación espacial de ambas clases que presentan en algunos momentos del año una señal similar.

2. Clase de Coberturas definidas en el trabajo “Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos”

En el trabajo “*Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos*” (Muñoz J. et al., 2003) se computó un total de 1.360.056 ha de bosques nativos y selvas ribereñas en la Prov., pero es sabido que el desmonte comenzó en años anteriores.

En dicho trabajo se consideraron las mismas clases de coberturas utilizadas en el “Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos” realizado por la SAyDS (2002) en la estratificación de cobertura del suelo, de acuerdo a la clasificación propuesta por FAO (1998) en el documento FRA 2000-Términos y Definiciones del Departamento de Montes de la FAO, con adecuación a las características y particularidades locales.

Las clases de coberturas definidas son:

- a) Bosque natural abierto.
 - b) Bosque natural cerrado.
-

c) Vegetación ribereña.

d) Palmar.

Cabe aclarar que todos los bosques son naturales, aún las plantaciones forestales con especies exóticas. Si bien se mantiene esta denominación, sería preferible usar el término ‘bosques nativos’.

La descripción de las categorías se muestra en la Tabla N° 8.3.

Tabla N° 8.3: Descripción de las categorías trabajo Muñoz 2003

Clases de coberturas	Descripción
Bosque natural	Formación compuesta por árboles autóctonos, no plantados por el hombre. En otras palabras, son bosques que excluyen las plantaciones. Los bosques naturales se clasifican además siguiendo los siguientes criterios: formación boscosa (o tipo): cerrada/abierta, grado de intervención humana, composición de las especies.
Bosque natural cerrado	Formación donde los árboles de distintas alturas y el sotobosque (arbustos) cubren gran parte del terreno (> 40 %). Se trata de bosques primarios o en estado avanzado de reconstitución, que pueden haber sido aprovechados una o varias veces, pero que han conservado sus características de rodales forestales, posiblemente con una estructura y composición modificadas (modificado de FRA 2000).
Bosque natural abierto	Formación con una distribución discontinua de árboles, pero con una cobertura de copa de al menos 10% y menos del 40%. Generalmente hay una cubierta continua de pastos, que permite el pastoreo y la propagación de incendios (modificado de FRA 2000). Además, se diferencia del bosque alterado porque la altura, diámetro y edad de los árboles es más o menos uniforme, casi libre de arbustos.
Vegetación ribereña – Selva en Galería	Formación con más de un estrato de árboles, lianas, epifitas y helechos.
Vegetación ribereña – Bosque mixto	Formación con presencia de árboles hidrófilos y xerófilos y menos abundancia o ausencia de las categorías típicas de la selva.
Vegetación ribereña – Bosque ribereño	Formación boscosa, de una o varias especies (timbozal, sauzal, alisal, etc.), con árboles hidrófilos de aproximadamente la misma altura. Son escasas o inexistentes las lianas, las epifitas y los helechos

Para la identificación de las distintas categorías de coberturas se utilizaron imágenes LANDSAT 7 ETM+, correspondientes al 26/12/2002 y al 18/01/2003.

El mapa resultante de este trabajo se muestra en la Figura N° 8.2; donde se observa la distribución de las 4 clases de coberturas definidas.

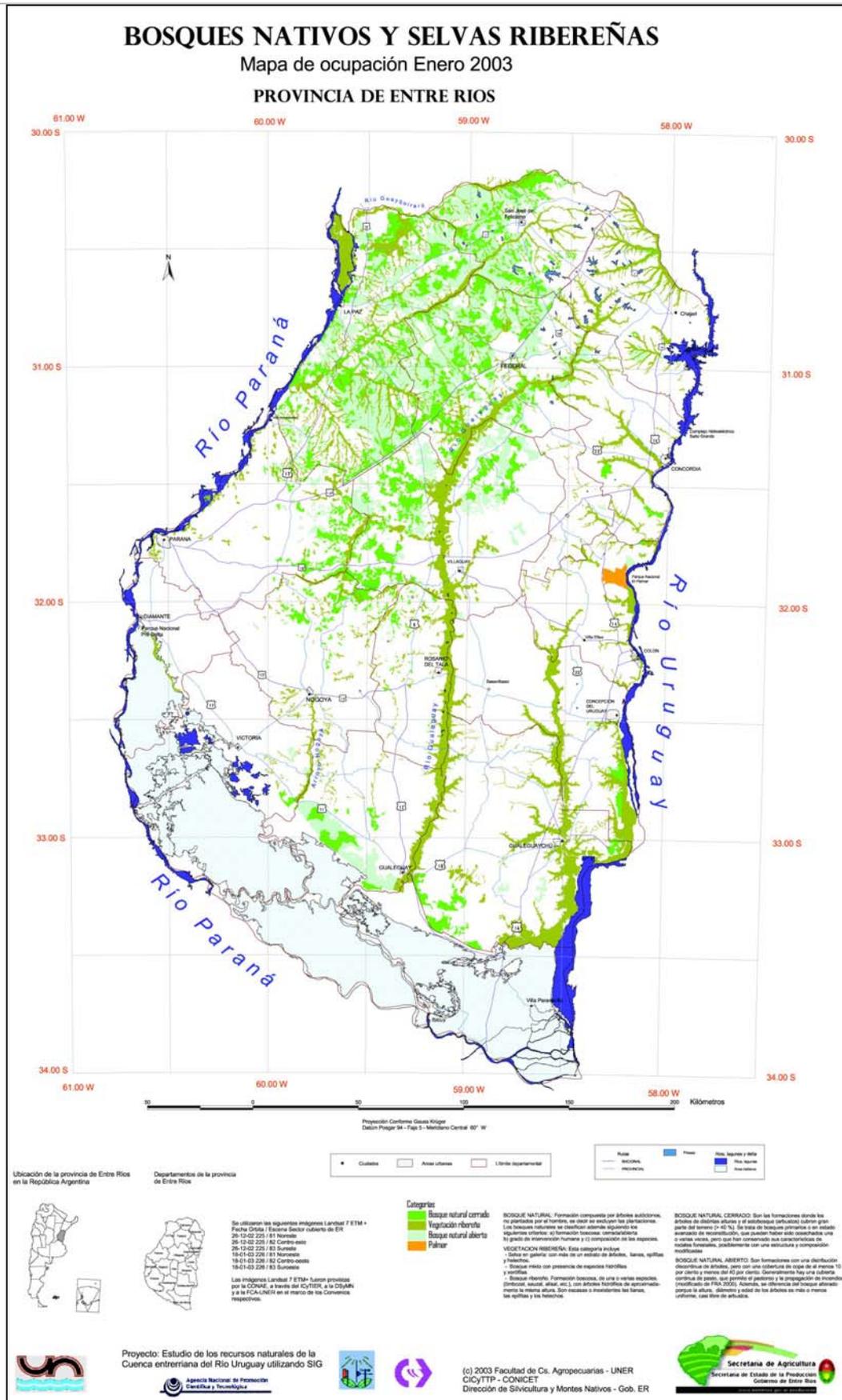


Figura N° 8.2: Mapa de bosques nativos y selvas ribereñas en la Provincia de Entre Ríos (Muñoz, 2003)

ANEXO IX: MATRICES DE CONTIGENCIA

Tabla N° 9.1: Matriz de Contingencia por porcentaje de pixeles – Clasificación imagen 1986.

Clase		Bosque	Monte	Cultivo 1	Cultivo 2	Past+barb	Suelo desn.	Agua	Suelo quem.
1	Bosque	88.55	7.25	2.78	0.52	0.00	0.00	0.02	0.00
2	Monte	8.34	90.70	0.49	1.06	0.23	0.01	0.00	0.21
3	Cultivo 1	2.16	0.57	96.64	0.14	0.02	0.14	0.02	0.00
4	Cultivo 2	0.95	0.93	0.09	95.23	3.16	1.06	0.00	0.35
5+6	Past+barb	0.00	0.31	0.00	1.36	96.56	0.33	0.00	0.00
7	Suelo desn.	0.00	0.00	0.00	1.71	0.02	97.70	0.05	1.64
8	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.80	0.00
9	Suelo quem.	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	97.79
Total		100	100	100	100	100	100	100	100

Error Promedio = 95.37

Tabla N° 9.2: Matriz de Contingencia por porcentaje de pixeles – Clasificación imagen 1997.

Clase		Bosque	Monte	Cultivo 1	Cultivo 2	Pastura	Barbecho	Suelo desnudo	Agua
1	Bosque	95.87	3.09	1.49	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
2	Monte	2.76	90.56	0.08	0.00	4.12	0.44	0.04	0.00
3	Cultivo 1	1.35	0.26	96.22	0.98	0.55	0.00	0.00	0.00
4	Cultivo 2	0.00	0.06	1.85	99.01	0.01	0.00	0.00	0.00
5	Pastura	0.00	5.10	0.37	0.00	95.22	0.05	0.00	0.00
6	Barbecho	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	98.36	2.94	0.00
7	Suelo desn.	0.03	0.90	0.00	0.01	0.09	1.16	97.02	0.00
8	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
Total		100	100	100	100	100	100	100	100

Error Promedio = 96.53

Tabla N° 9.3: Matriz de Contingencia por porcentaje de pixeles – Clasificación imagen 2006.

Clase		Bosque	Monte	Cultivo 1	Cultivo 2	Pastura	Barbecho	Suelo desnudo	Agua
1	Bosque	96.52	2.56	0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Monte	3.38	91.49	0.06	0.06	7.63	0.01	0.43	0.00
3	Cultivo 1	0.07	0.42	99.76	0.40	0.11	0.01	0.00	0.00
4	Cultivo 2	0.03	0.04	0.03	99.31	0.08	0.52	0.08	0.03
5	Pastura	0.00	5.42	0.03	0.08	92.15	0.04	0.02	0.00
6	Barbecho	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	99.12	0.21	0.00
7	Suelo desn.	0.01	0.06	0.00	0.02	0.01	0.30	99.25	0.00
8	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.97
Total		100	100	100	100	100	100	100	100

Error Promedio = 97.20

ANEXO X: TABLAS DE ATRIBUTOS DE LOS SHAPEFILE*Tabla N° 10.1: Tabla de atributos de las subcuencas – parámetros físicos.*

ID	GRID CODE	AREA	WS_	SLOPE	MEAN_Z	CENTROID_X	CENTROID_Y	WIDTH	LENGTH
1	134198	120763291.050	11	0.0032	72.6988	5652979.54	6640986.88	13254.83	9110.89
3	1	87124167.062	12	0.0036	66.9784	5628858.62	6644724.65	2844.32	30630.88
3	1	119544773.760	13	0.0029	66.4640	5637728.76	6641447.36	3902.75	30630.88
10	140738	126681311.320	21	0.0034	71.0813	5646552.74	6633729.92	12072.81	10493.11
8	4	9085710.054	22	0.0058	64.2963	5636228.75	6636305.65	1287.59	7056.36
8	4	24865180.335	23	0.0036	66.7954	5639253.50	6632281.16	3523.80	7056.36
15	135658	122082752.140	31	0.0033	70.8532	5644103.28	6624244.00	13423.95	9094.40
9	5	9530444.848	32	0.0044	64.1116	5636363.46	6632512.94	1232.09	7735.20
9	5	13031722.611	33	0.0045	66.0566	5635094.30	6631340.65	1684.73	7735.20
21	149352	134411493.540	41	0.0014	70.8372	5634098.61	6612223.69	10526.18	12769.25
26	7	182118474.660	42	0.0027	68.4773	5633449.46	6624771.88	6404.06	28437.96
26	7	54108325.510	43	0.0034	68.1779	5625113.31	6623260.80	1902.68	28437.96
30	133559	120130628.580	51	0.0024	67.0463	5628481.08	6603407.14	11728.60	10242.54
40	13	40648681.742	52	0.0022	64.1627	5620778.46	6608817.86	7528.68	5399.18
40	13	7925133.178	53	0.0021	58.0647	5619548.46	6603305.65	1467.84	5399.18
49	134887	121392128.780	61	0.0020	64.7565	5611088.86	6595724.67	13133.90	9242.66
37	12	6170837.573	62	0.0019	51.2727	5611564.92	6606172.48	1566.96	3938.09
37	12	6030742.119	63	0.0045	53.9622	5610441.98	6605514.59	1531.39	3938.09
53	235938	212319899.970	71	0.0023	66.7342	5623475.19	6592910.57	13872.31	15305.30
44	14	9683727.996	72	0.0012	55.4052	5618298.37	6603199.13	1363.80	7100.55
44	14	9316450.532	73	0.0032	57.6404	5616510.96	6602307.94	1312.08	7100.55
28	133681	120298931.490	81	0.0030	59.9081	5583587.51	6618338.85	9381.59	12822.87
20	8	337518792.740	82	0.0085	56.7127	5550663.80	6603680.65	5612.64	60135.43
20	8	281359649.320	83	0.0066	53.4635	5566208.46	6600703.92	4678.77	60135.43
62	159825	143834464.300	91	0.0040	66.3961	5608364.26	6582734.67	10081.97	14266.50
56	21	80456334.319	92	0.0056	58.2183	5599019.88	6589459.58	5478.01	14687.16
56	21	32277265.951	93	0.0065	55.6592	5598587.72	6585245.65	2197.65	14687.16
64	136835	123143545.580	101	0.0040	65.0222	5600126.67	6574102.32	13034.44	9447.55
59	22	22427056.969	102	0.0089	52.2803	5595068.46	6585937.95	1618.17	13859.53
59	22	77930875.156	103	0.0061	57.6111	5591362.71	6581990.65	5622.91	13859.53
69	134424	120973103.450	111	0.0070	56.0340	5563841.58	6571663.85	9680.94	12496.00
63	25	26862806.123	112	0.0091	44.4910	5558955.67	6581611.86	1980.91	13560.83
63	25	43919451.708	113	0.0070	51.8868	5557103.61	6576658.44	3238.70	13560.83
70	139344	125387784.170	121	0.0029	62.0823	5590546.26	6570502.32	10129.55	12378.42
65	18	101394992.560	122	0.0051	54.5933	5581395.81	6585484.43	3440.55	29470.56
65	18	98928988.648	123	0.0056	53.2191	5578414.33	6583160.65	3356.87	29470.56
72	136446	122811211.070	131	0.0020	63.6155	5579378.91	6566529.42	11740.73	10460.27
57	20	75881893.878	132	0.0072	50.4231	5572335.81	6582323.51	2487.39	30506.69
57	20	135883280.200	133	0.0056	56.9085	5569973.31	6576958.55	4454.21	30506.69
7	3	14110325.932	142	0.0041	61.5994	5630785.33	6637382.38	1291.08	10929.06
7	3	24127785.704	143	0.0033	63.5214	5630483.31	6634819.55	2207.67	10929.06
6	2	43812678.290	152	0.0038	63.7767	5622286.25	6640153.00	5455.42	8031.04
6	2	24691286.266	153	0.0022	58.0281	5625482.00	6635762.56	3074.48	8031.04
14	6	220384274.660	162	0.0046	59.6410	5606420.17	6627208.00	5175.81	42579.67
14	6	331287982.550	163	0.0024	60.1136	5610555.81	6623188.44	7780.43	42579.67
22	9	36632144.329	172	0.0031	52.2875	5608611.30	6611722.60	1470.09	24918.22
22	9	120791473.450	173	0.0024	56.2392	5602655.17	6605965.80	4847.52	24918.22

ID	GRID CODE	AREA	WS_	SLOPE	MEAN_Z	CENTROID X	CENTROID Y	WIDTH	LENGTH
36	11	38596329.137	182	0.0031	59.7086	5614973.46	6609612.59	5042.85	7653.67
36	11	13077999.717	183	0.0020	52.9407	5613482.07	6605465.65	1708.72	7653.67
52	16	78743028.070	192	0.0058	52.9220	5589728.46	6595363.61	4227.88	18624.73
52	16	66422119.932	193	0.0056	50.9370	5584771.11	6591965.65	3566.34	18624.73
18	10	164619130.370	202	0.0063	56.6956	5585814.22	6609785.65	5103.67	32255.06
18	10	221561662.180	203	0.0042	54.6034	5592839.01	6603643.44	6869.05	32255.06
50	15	42675103.087	212	0.0076	52.9101	5576014.01	6601889.27	2803.20	15223.68
50	15	47750059.518	213	0.0051	50.4956	5579107.62	6592708.30	3136.56	15223.68
38	17	53651352.949	222	0.0104	51.5356	5567295.33	6597620.65	3070.40	17473.74
38	17	61584184.806	223	0.0064	44.6102	5569425.81	6589735.81	3524.39	17473.74
46	19	46940349.793	232	0.0124	50.1249	5558498.46	6591568.31	2378.78	19732.96
46	19	81710079.647	233	0.0063	44.7933	5560319.79	6585463.71	4140.79	19732.96
55	23	4972021.907	242	0.0052	34.6387	5553011.84	6586325.65	1162.53	4276.89
55	23	2561572.030	243	0.0045	37.1935	5553038.31	6583820.65	598.93	4276.89
66	24	54063553.023	252	0.0133	46.6394	5545351.11	6583587.19	3449.58	15672.51
66	24	138288055.100	253	0.0075	46.3125	5549928.95	6577366.20	8823.61	15672.51

Tabla N° 10.2: Tabla de atributos de las subcuencas – parámetros cobertura y suelo.

ID	INT	COVER	MANN_N	PCT IMPERV	PAVE	SPLASH	ROCK	KS	G	POR	SMAX	CV	FRACT SAND	FRACT SILT	FRACT CLAY	DIST	COHESION
1	1.63	26.45	0.121	0.000	0.00	114.95	0.15	0.53	405.52	0.475	0.81	0.50	0.13	0.29	0.58	0.16	0.007
3	1.55	26.65	0.137	0.000	0.00	122.55	0.10	1.53	338.92	0.470	0.82	0.70	0.26	0.25	0.50	0.20	0.007
3	1.69	26.05	0.137	0.000	0.00	126.60	0.08	2.06	303.40	0.467	0.83	0.81	0.32	0.23	0.45	0.22	0.008
10	1.70	25.75	0.134	0.000	0.00	116.98	0.14	0.79	387.76	0.474	0.81	0.56	0.17	0.28	0.55	0.17	0.007
8	1.29	23.85	0.119	0.000	0.00	126.77	0.08	2.03	301.92	0.467	0.83	0.81	0.32	0.23	0.45	0.22	0.008
8	1.68	26.55	0.143	0.000	0.00	127.61	0.07	2.21	294.52	0.467	0.83	0.83	0.34	0.22	0.44	0.22	0.008
15	1.80	26.25	0.144	0.000	0.00	115.29	0.11	0.65	402.56	0.475	0.81	0.51	0.18	0.22	0.60	0.16	0.007
9	1.57	27.80	0.148	0.000	0.00	131.66	0.05	2.79	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
9	1.69	31.25	0.121	0.000	0.00	130.65	0.05	2.75	267.88	0.465	0.84	0.91	0.39	0.19	0.41	0.24	0.008
21	1.43	29.30	0.120	0.000	0.00	115.46	0.06	0.78	401.08	0.475	0.81	0.52	0.24	0.14	0.62	0.16	0.007
26	1.58	28.30	0.139	0.000	0.00	119.21	0.06	1.37	354.09	0.467	0.81	0.64	0.28	0.16	0.56	0.18	0.007
26	1.48	29.40	0.142	0.000	0.00	120.02	0.09	1.29	361.12	0.472	0.82	0.64	0.25	0.22	0.53	0.18	0.007
30	1.29	28.75	0.148	0.000	0.00	115.16	0.05	0.89	389.61	0.469	0.80	0.53	0.25	0.13	0.62	0.17	0.007
40	1.16	28.25	0.141	0.000	0.00	130.82	0.05	2.69	266.40	0.465	0.84	0.92	0.39	0.20	0.41	0.24	0.008
40	1.07	28.45	0.147	0.000	0.00	122.38	0.05	1.66	340.40	0.470	0.82	0.70	0.31	0.15	0.54	0.20	0.007
49	1.22	29.75	0.148	0.000	0.00	129.64	0.05	2.58	276.76	0.465	0.84	0.89	0.38	0.19	0.43	0.23	0.008
37	1.17	30.30	0.149	0.000	0.00	131.66	0.05	2.86	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
37	1.17	30.60	0.153	0.000	0.00	131.66	0.05	2.87	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
53	1.27	29.55	0.149	0.000	0.00	118.97	0.06	1.09	384.43	0.478	0.82	0.58	0.26	0.15	0.59	0.18	0.007
44	1.15	29.70	0.150	0.000	0.00	131.16	0.05	2.77	263.44	0.464	0.84	0.93	0.40	0.20	0.41	0.24	0.008
44	1.10	29.00	0.141	0.000	0.00	131.66	0.05	2.82	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
28	1.16	29.20	0.146	0.000	0.00	130.31	0.06	2.65	270.84	0.465	0.84	0.90	0.39	0.20	0.41	0.23	0.008
20	1.17	28.95	0.119	0.000	0.00	119.11	0.09	3.10	343.16	0.468	0.83	0.48	0.31	0.17	0.52	0.18	0.007
20	1.17	29.35	0.145	0.000	0.00	120.35	0.06	1.40	358.16	0.471	0.82	0.65	0.30	0.15	0.55	0.19	0.007
62	1.28	28.90	0.149	0.000	0.00	128.46	0.05	2.41	287.12	0.466	0.83	0.86	0.37	0.18	0.45	0.22	0.008
56	1.16	30.00	0.153	0.000	0.00	130.48	0.05	2.70	269.36	0.465	0.84	0.91	0.39	0.19	0.42	0.23	0.008
56	1.19	31.85	0.164	0.000	0.00	129.30	0.05	2.60	279.72	0.466	0.84	0.88	0.38	0.19	0.43	0.23	0.008
64	1.21	29.65	0.148	0.000	0.00	131.66	0.05	2.84	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
59	1.14	31.10	0.161	0.000	0.00	130.99	0.05	2.80	264.92	0.464	0.84	0.92	0.39	0.20	0.41	0.24	0.008
59	1.20	30.35	0.153	0.000	0.00	131.66	0.05	2.86	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008

ID	INT	COVER	MANN_N	PCT IMPERV	PAVE	SPLASH	ROCK	KS	G	POR	SMAX	CV	FRACT SAND	FRACT SILT	FRACT CLAY	DIST	COHESION
69	0.97	27.75	0.128	0.000	0.00	129.64	0.05	2.53	276.76	0.465	0.84	0.89	0.38	0.19	0.43	0.23	0.008
63	1.26	31.60	0.123	0.000	0.00	114.14	0.05	0.79	398.49	0.470	0.80	0.51	0.25	0.12	0.63	0.16	0.007
63	0.86	26.80	0.120	0.000	0.00	124.03	0.05	1.70	340.03	0.474	0.83	0.72	0.32	0.16	0.52	0.20	0.008
70	1.11	29.10	0.144	0.000	0.00	131.66	0.05	2.82	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
65	1.07	29.40	0.146	0.000	0.00	123.93	0.05	2.00	312.65	0.464	0.82	0.76	0.34	0.17	0.49	0.21	0.008
65	0.96	27.20	0.129	0.000	0.00	127.24	0.05	2.09	311.91	0.472	0.84	0.80	0.35	0.17	0.48	0.22	0.008
72	1.11	29.50	0.147	0.000	0.00	131.66	0.05	2.84	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
57	0.92	27.00	0.127	0.000	0.00	116.47	0.05	0.92	392.20	0.474	0.81	0.54	0.26	0.13	0.61	0.17	0.007
57	1.03	28.65	0.137	0.000	0.00	127.28	0.05	2.27	297.48	0.467	0.83	0.83	0.36	0.18	0.46	0.22	0.008
7	1.42	28.90	0.158	0.000	0.00	129.64	0.05	2.56	276.76	0.465	0.84	0.89	0.38	0.19	0.43	0.23	0.008
7	1.43	30.00	0.157	0.000	0.00	131.66	0.05	2.85	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
6	1.13	29.20	0.141	0.000	0.00	116.81	0.11	0.86	389.24	0.474	0.81	0.55	0.19	0.23	0.58	0.17	0.007
6	1.19	30.95	0.157	0.000	0.00	120.69	0.09	1.72	348.98	0.472	0.83	0.57	0.29	0.16	0.55	0.18	0.007
14	1.15	29.85	0.146	0.000	0.00	120.83	0.07	1.61	339.26	0.466	0.82	0.67	0.30	0.18	0.52	0.19	0.007
14	1.26	30.05	0.150	0.000	0.00	121.81	0.06	1.63	344.81	0.470	0.82	0.68	0.30	0.17	0.53	0.19	0.007
22	1.17	31.95	0.165	0.000	0.00	125.96	0.05	2.31	294.89	0.462	0.82	0.82	0.36	0.19	0.44	0.22	0.008
22	1.18	31.15	0.159	0.000	0.00	127.11	0.05	2.30	298.96	0.467	0.83	0.82	0.36	0.19	0.46	0.22	0.008
36	1.15	30.05	0.146	0.000	0.00	131.66	0.05	2.85	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
36	1.28	32.30	0.151	0.000	0.00	131.66	0.05	2.92	259.00	0.464	0.84	0.94	0.40	0.20	0.40	0.24	0.008
52	1.08	29.95	0.151	0.000	0.00	123.90	0.05	1.88	327.08	0.469	0.83	0.74	0.33	0.17	0.50	0.20	0.008
52	1.09	29.35	0.145	0.000	0.00	121.37	0.05	1.54	349.28	0.471	0.82	0.67	0.31	0.16	0.53	0.19	0.007
18	1.18	30.70	0.149	0.000	0.00	120.69	0.05	1.48	355.20	0.471	0.82	0.65	0.30	0.16	0.54	0.19	0.007
18	1.13	30.50	0.154	0.000	0.00	124.24	0.05	1.93	324.12	0.469	0.83	0.75	0.33	0.19	0.48	0.20	0.008
50	1.12	29.95	0.147	0.000	0.00	119.34	0.05	1.30	367.04	0.472	0.82	0.62	0.29	0.16	0.55	0.18	0.007
50	1.02	28.85	0.136	0.000	0.00	115.12	0.05	0.76	404.04	0.475	0.81	0.51	0.25	0.14	0.61	0.16	0.007
38	1.11	29.15	0.144	0.000	0.00	117.35	0.05	1.18	370.37	0.468	0.81	0.59	0.28	0.15	0.57	0.18	0.007
38	1.03	28.65	0.138	0.000	0.00	116.81	0.05	0.97	389.24	0.474	0.81	0.55	0.27	0.16	0.57	0.17	0.007
46	1.16	29.65	0.129	0.000	0.00	115.97	0.05	0.87	396.64	0.474	0.81	0.53	0.26	0.15	0.59	0.17	0.007
46	1.04	29.15	0.132	0.000	0.00	118.33	0.05	1.17	375.92	0.473	0.82	0.59	0.28	0.17	0.55	0.18	0.007
55	1.16	31.25	0.164	0.000	0.00	114.78	0.05	0.74	407.00	0.475	0.81	0.50	0.25	0.23	0.52	0.16	0.007
55	1.65	37.05	0.099	0.000	0.00	114.78	0.05	0.78	407.00	0.475	0.81	0.50	0.25	0.17	0.58	0.16	0.007
66	1.06	29.70	0.138	0.000	0.00	115.59	0.05	1.11	398.03	0.475	0.81	0.50	0.25	0.14	0.61	0.16	0.007
66	1.01	28.75	0.132	0.000	0.00	123.02	0.07	3.88	320.47	0.471	0.84	0.53	0.31	0.18	0.51	0.19	0.008

Tabla N° 10.3: Tabla de atributos de los canales.

ARCID	GRID CODE	FROM NODE	TO NODE	STREAM	CONT CHAN	LENGTH	X_VAL	Y_VAL	ORDER	SLOPE	DOWN WIDTH	UP WIDTH
1	1	1	2	14	11	30630,881	5634162,716	6645714,568	1	0,000	747,014	612,620
2	2	4	2	144	24	10929,058	5630517,218	6636232,722	99	0,000	754,169	736,682
3	1	3	4	24	21	7056,363	5635962,522	6635051,630	1	0,000	648,385	618,478
4	2	2	5	154	14	8031,040	5623930,641	6637156,292	99	0,000	878,301	861,497
5	1	6	4	34	31	7735,203	5634923,011	6632367,526	1	0,001	635,006	613,946
6	1	7	5	44	41	28437,955	5627910,949	6625679,362	1	0,000	765,648	625,807
7	2	5	9	164	154	42579,669	5608632,058	6624082,873	99	0,000	1031,574	952,136
8	2	10	9	174	184	24918,223	5603121,751	6612685,071	99	0,000	879,070	838,429
9	2	11	10	184	54	7653,672	5613390,583	6608043,903	99	0,001	796,349	777,349
10	1	12	11	54	51	5399,180	5618577,010	6604847,280	1	0,000	654,738	611,981
11	1	13	10	64	61	3938,090	5611176,072	6606161,630	1	0,001	625,048	613,254
12	1	14	11	74	71	7100,546	5616656,842	6602633,098	1	0,000	697,151	685,371
13	3	9	15	204	164	32255,056	5588878,010	6605130,285	99	0,000	1143,418	1110,101
14	3	15	16	214	204	15223,684	5576090,985	6597868,955	99	0,000	1196,429	1190,240
15	3	16	17	224	214	17473,738	5567393,049	6595278,739	99	0,000	1224,894	1217,712
16	2	18	15	194	94	18624,725	5585029,140	6595587,401	99	0,000	849,501	806,049
17	1	8	19	84	81	60135,426	5557682,646	6603790,012	1	0,000	878,236	612,151
18	3	17	20	234	224	19732,964	5558405,372	6590074,637	99	0,000	1252,170	1244,835
19	3	20	19	244	234	4276,893	5552989,292	6585570,648	99	0,000	1263,201	1262,791
20	1	21	18	94	91	14687,160	5597038,515	6589121,630	1	0,001	711,658	634,297
21	1	22	18	104	101	13859,532	5593118,310	6585399,575	1	0,000	692,401	615,003
22	3	19	23	254	84	15672,511	5547998,310	6582182,195	99	0,000	1310,192	1301,039
23	1	24	20	114	111	13560,829	5556665,432	6581023,549	1	0,000	671,627	612,832
24	1	25	16	124	121	29470,565	5579006,726	6586251,133	1	0,001	746,232	617,217
25	1	26	17	134	131	30506,686	5569014,748	6582969,985	1	0,001	750,226	614,673
0	2	0	0	144	34	10929,058	0,000	0,000	0	0,000	754,169	736,682
0	2	0	0	154	144	8031,040	0,000	0,000	0	0,000	878,301	861,497
0	2	0	0	164	44	42579,669	0,000	0,000	0	0,000	1031,574	952,136
0	2	0	0	174	64	24918,223	0,000	0,000	0	0,000	879,070	838,429
0	2	0	0	184	74	7653,672	0,000	0,000	0	0,000	796,349	777,349
0	3	0	0	204	174	32255,056	0,000	0,000	0	0,000	1143,418	1110,101

ARCID	GRID CODE	FROM NODE	TO NODE	STREAM	CONT CHAN	LENGTH	X_VAL	Y_VAL	ORDER	SLOPE	DOWN WIDTH	UP WIDTH
0	3	0	0	214	194	15223,684	0,000	0,000	0	0,000	1196,429	1190,240
0	3	0	0	224	124	17473,738	0,000	0,000	0	0,000	1224,894	1217,712
0	2	0	0	194	104	18624,725	0,000	0,000	0	0,000	849,501	806,049
0	3	0	0	234	134	19732,964	0,000	0,000	0	0,000	1252,170	1244,835
0	3	0	0	244	114	4276,893	0,000	0,000	0	0,000	1263,201	1262,791
0	3	0	0	254	244	15672,511	0,000	0,000	0	0,000	1310,192	1301,039

Tabla N° 10.3 (continuación) : Tabla de atributos de los canales.

DOWN DEPTH	UP DEPTH	SS1	SS2	MAN	WOOL	CV	KSAT	G	DIST	POR	ROCK	PCT CLAY	PCT SILT	PCT SAND	SP	COH	QBASE
5,010	3,752	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,080	4,909	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,075	3,804	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,345	6,169	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
3,953	3,763	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,193	3,870	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
8,024	7,138	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,353	5,929	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,500	5,310	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,133	3,746	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
3,863	3,757	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,530	4,419	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
9,326	8,932	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
9,965	9,889	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,313	10,225	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,044	5,598	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,344	3,747	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,650	10,559	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,787	10,782	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,668	3,947	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,485	3,773	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
11,379	11,263	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
4,290	3,753	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,002	3,793	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,041	3,770	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,080	4,909	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,345	6,169	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
8,024	7,138	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,353	5,929	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
5,500	5,310	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
9,326	8,932	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000

DOWN DEPTH	UP DEPTH	SS1	SS2	MAN	WOOL	CV	KSAT	G	DIST	POR	ROCK	PCT CLAY	PCT SILT	PCT SAND	SP	COH	QBASE
9,965	9,889	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,313	10,225	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
6,044	5,598	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,650	10,559	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
10,787	10,782	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000
11,379	11,263	1,000	1,000	0,070	Yes	1,000	0,600	407,000	0,160	0,475	0,000	0,500	0,230	0,270	63,000	0,007	-999,000

Tabla N° 10.3 (continuación): Tabla de atributos de los canales.

STREAM	SEQUENCE	AREA	CUM AREA
14	12	327432231.87	327432231.87
144	11	38238111.64	343515232.95
24	9	160632201.71	160632201.71
154	13	68503964.56	739451429.38
34	10	144644919.60	144644919.60
44	14	370638293.71	370638293.71
164	15	551672257.21	1661761980.30
174	8	157423617.78	742716177.10
184	6	51674328.85	451698850.85
54	4	168704443.50	168704443.50
64	7	133593708.47	133593708.47
74	5	231320078.50	231320078.50
204	16	386180792.55	2790658949.95
214	17	90425162.60	3506318802.82
224	19	115235537.76	3947266105.96
194	3	145165148.00	625234690.27
84	24	739177373.55	739177373.55
234	21	128650429.44	4410492920.55
244	23	7533593.94	4609781875.77
94	1	256568064.57	256568064.57
104	2	223501477.70	223501477.70
254	25	192351608.12	5541310857.44
114	22	191755361.28	191755361.28
124	18	325711765.38	325711765.38
134	20	334576385.15	334576385.15
144	11	38238111.64	343515232.95
154	13	68503964.56	739451429.38
164	15	551672257.21	1661761980.30
174	8	157423617.78	742716177.10
184	6	51674328.85	451698850.85
204	16	386180792.55	2790658949.95
214	17	90425162.60	3506318802.82
224	19	115235537.76	3947266105.96
194	3	145165148.00	625234690.27
234	21	128650429.44	4410492920.55
244	23	7533593.94	4609781875.77
254	25	192351608.12	5541310857.44

ANEXO XI: ARCHIVO DE PRECIPITACIONES (*.pre)

Archivo creado para el evento de abril de 1986, de acuerdo a los valores registrados en cada estación:

! User-defined storm created in AGWA Wed Mar 11 09:36:21 2009

!** AGWA does not apply an area reduction factor to these data.

BEGIN RG1

N = 5

! 1 Banderas

TIME	DEPTH
!	(min) (mm)
0	0.0
360	175.0
720	175.0
1080	221.0
45000	221

SA = 0.4

x = 5573272

Y = 6590365

END

BEGIN RG2

N = 5

! 2 Colonia Oficial N°3

TIME	DEPTH
!	(min) (mm)
0	0.0
360	109.0
720	109.0
1080	213.0
45000	213.0

SA = 0.4

x = 5556185

Y = 6620114

END

BEGIN RG3

N = 5

! 3 Cto Bernardi

TIME	DEPTH
!	(min) (mm)
0	0.0
360	105.0
720	105.0
1080	153.0
45000	153.0

SA = 0.4

x = 5587453

Y = 6564908

End

BEGIN RG4

N = 5

! 4 El Carmen

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 152.0
    720 152.0
    1080 200.0
    45000 200.0
SA = 0.4
x = 5559320
Y = 6586679
END
BEGIN RG5
N = 5
! 5 El Cimarron
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 117.0
    720 117.0
    1080 150.0
    45000 150.0
SA = 0.4
x = 5601093
Y = 6572063
END
BEGIN RG6
N = 5
! 6 Esperanza
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 112.0
    720 112.0
    1080 147.0
    45000 147.0
SA = 0.4
x = 5652705
Y = 6621949
END
BEGIN RG7
N = 5
! 7 Estacas
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 94.0
    720 94.0
    1080 194.0
    45000 194.0
SA = 0.4
x = 5571194
Y = 6616965
END
BEGIN RG8
N = 5
! 8 Federal
```

```
    TIME DEPTH
!   (min) (mm)
    0   0.0
    360 114.0
    720 114.0
    1080 136.0
    45000 136.0
```

```
SA = 0.4
```

```
x = 5616603
```

```
Y = 6575357
```

```
END
```

```
BEGIN RG9
```

```
N = 5
```

```
! 9 Feliciano
```

```
    TIME DEPTH
!   (min) (mm)
    0   0.0
    360 122.0
    720 122.0
    1080 182.0
    45000 182.0
```

```
SA = 0.4
```

```
x = 5620102
```

```
Y = 6638518
```

```
END
```

```
BEGIN RG10
```

```
N = 5
```

```
! 11 La Esmeralda
```

```
    TIME DEPTH
!   (min) (mm)
    0   0.0
    360 90.0
    720 90.0
    1080 134.0
    45000 134.0
```

```
SA = 0.4
```

```
x = 5628485
```

```
Y = 6647201
```

```
END
```

```
BEGIN RG11
```

```
N = 5
```

```
! 12 La Paz
```

```
    TIME DEPTH
!   (min) (mm)
    0   0.0
    360 147.0
    720 147.0
    1080 177.0
    45000 177.0
```

```
SA = 0.4
```

```
x = 5535053
```

```
Y = 6598480
```

```
END
```

```
BEGIN RG12
```

```
N = 5
```

```
! 13 Los Conquistadores
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 89.0
    720 89.0
    1080 144.0
    45000 144
SA = 0.4
x = 5648612
Y = 6614143
END
BEGIN RG13
N = 5
! 15 San Gustavo
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 178.0
    720 178.0
    1080 230.0
    45000 230.0
SA = 0.4
x = 5559016
Y = 6605775
END
BEGIN RG14
N = 5
! 16 San Jaime
```

```
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.0
    360 99.0
    720 99.0
    1080 129.0
    45000 129.0
SA = 0.4
x = 5663412
Y = 6641656
END
```

Archivo creado para el evento teórico para una recurrencia de 5 años, de acuerdo a los valores del trabajo de la UTN - Concordia

```
BEGIN RG1
N = 8
```

```
! Recurrencia 5 años
      TIME DEPTH
! (min) (mm)
    0  0.00
    60  15
    120 68
    180 95
    240 105
    300 111
    360 114
    45000 114
SA = 0.4
END
```

ANEXO XII: ARCHIVO DE PARÁMETROS (*.par) CREADO CON EL MODELO AGWA – KINEROS2

Parte de un archivo de parámetros generado por el modelo AGWA-KINEROS2:

```
! File Info
! Watershed:      wfa12
! LandCover:     Nalc1986
! Soils:         Suelo_feli_fao.shp
! Number of Channels: 25
! Number of Planes: 63
! Contrib Source Area: 12000 Hectares
! DEM GRid Size: 30 m
! Total Drainage Area: 1.36928e+006 Acres (554130 ha)
! AGWA Version:  beta
! Creation Date: 07/24/2009 12:42
! End of File Info
BEGIN GLOBAL
  CLEN = 10, UNITS = METRIC
  DIAMS = 0.25, 0.033, 0.004 ! mm
  DENSITY = 2.65, 2.65, 2.65 ! g/cc
  TEMP = 33 !deg C
  NELE = 88
END GLOBAL
BEGIN PLANE
  ID = 91, LEN = 10082.0, WID = 14266.5
  SL = 0.004, MAN = 0.148, X = 5608364.3, Y = 6582734.7
  CV = 0.86, PRINT = 1
  KS = 2.39, G = 287.12, DIST = 0.22, POR = 0.466, ROCK = 0.05
  FR = 0.37, 0.18, 0.45, SPLASH = 128.46, COH = 0.008, SMAX = 0.83
  INTER = 1.33, CANOPY = 0.2825, PAVE = 0.00
END PLANE
BEGIN PLANE
  ID = 92, LEN = 5478.0, WID = 14687.2
  SL = 0.006, MAN = 0.123, X = 5599019.9, Y = 6589459.6
  CV = 0.91, PRINT = 1
  KS = 2.51, G = 269.36, DIST = 0.23, POR = 0.465, ROCK = 0.05
  FR = 0.39, 0.19, 0.42, SPLASH = 130.48, COH = 0.008, SMAX = 0.84
  INTER = 0.92, CANOPY = 0.231, PAVE = 0.00
END PLANE
BEGIN PLANE
  ID = 93, LEN = 2197.7, WID = 14687.2
  SL = 0.006, MAN = 0.155, X = 5598587.7, Y = 6585245.7
  CV = 0.88, PRINT = 1
  KS = 2.56, G = 279.72, DIST = 0.23, POR = 0.466, ROCK = 0.05
  FR = 0.38, 0.19, 0.43, SPLASH = 129.30, COH = 0.008, SMAX = 0.84
  INTER = 1.16, CANOPY = 0.3055, PAVE = 0.00
END PLANE
BEGIN CHANNEL
  ID = 94, PRINT = 1
  LAT = 92 93
  UP = 91
  LEN = 14687.16, SLOPE = 0.0010, X = 5597038.515, Y = 6589121.630
  WIDTH = 634.30, 711.66, DEPTH = 3.95, 4.67
  MAN = 0.140, SS1 = 1.00, SS2 = 1.00
  WOOL = Yes
  CV = 1.00, KSAT = 0.6, G = 407
  DIST = 0.1600, POR = 0.4750, ROCK = 0.00
  FR = 0.2700, 0.2300, 0.5000, SP = 63.00, COH = 0.0070
```

END CHANNEL

Es importante señalar que en el caso de los segmentos plano los valores de LEN y WID corresponden a los valores de Width y Length de la tabla de atributos que se visualiza en Arc View.

ANEXO XIII: ARCHIVO DE SALIDA (*.out) DEL MODELO AGWA – KINEROS2

Recurrencia 5 años- Cobertura 1986

Channel Elem. 254

Contributing area = 554131.9 ha

	theta	rel.sat.
surface initial water content =	0.2436	0.4000
estimated wilting point water content =	0.2323	0.3676
estimated field capacity =	0.3398	0.6781

Peak flow = 254.3920 cu m /s (0.1652695 mm/hr) at 5700. min

Peak sediment discharge = 182.7891 kg/s at 5655. min

Water balance	Sediment balance
-----	-----
Rain: 0. cu m	In: 100193600. kg
Inflow: 177058800. cu m	Deposited: 1827265. kg
Infilt: 4679346. cu m	Suspended: 289268. kg
Stored: 1118944. cu m	Out: 98071184. kg
Out: 171257296. cu m	Error: 0.01 %
Error: 0.00 %	

88 elements Processed

Event Volume Summary:

Rainfall	114.0000 mm	631710208. cu m
Plane infiltration	67.9582	376577696.
Channel infiltration	10.0327	55594600.
Interception	0.3653	2024501.
Storage	0.7062	3913396.
Outflow	30.9055	171257296.

Error (Volume in - Volume out - Storage) = 4 percent

Time step was adjusted to meet Courant condition

Total watershed area = 554131.9 ha

Sediment yield = 176.9817 kg/ha

Sediment yield by particle class:

Particle size (mm)	0.250	0.033	0.004
Yield (kg/ha)	30.5727	56.0891	90.3199
% of total yield	17.27	31.69	51.03

Recurrencia 5 años- Cobertura 1997

Channel Elem. 254

Contributing area = 554131.9 ha

	theta	rel.sat.
surface initial water content =	0.2436	0.4000
estimated wilting point water content =	0.2323	0.3676
estimated field capacity =	0.3398	0.6781

Peak flow = 301.0390 cu m /s (0.1955744 mm/hr) at 8655. min

Peak sediment discharge = 227.1726 kg/s at 5445. min

Water balance		Sediment balance	
-----		-----	
Rain:	0. cu m	In:	119729600. kg
Inflow:	207214896. cu m	Deposited:	170378. kg
Infilt:	3264274. cu m	Suspended:	365104. kg
Stored:	1342141. cu m	Out:	119189000. kg
Out:	202604800. cu m	Error:	0.00 %
Error:	0.00 %		

88 elements Processed

Event Volume Summary:

Rainfall	114.0000 mm	631710208. cu m
Plane infiltration	59.3129	328671712.
Channel infiltration	7.2071	39937020.
Interception	0.3433	1902600.
Storage	0.9777	5417926.
Outflow	36.5626	202604800.

Error (Volume in - Volume out - Storage) = 8 percent!

Time step was adjusted to meet Courant condition

Total watershed area = 554131.9 ha

Sediment yield = 215.0915 kg/ha

Sediment yield by particle class:

Particle size (mm)	0.250	0.033	0.004
Yield (kg/ha)	41.3716	69.8018	103.9181
% of total yield	19.23	32.45	48.31

Recurrencia 5 años - Cobertura 2006

Channel Elem. 254

Contributing area = 554131.9 ha

	theta	rel.sat.
surface initial water content =	0.2436	0.4000
estimated wilting point water content =	0.2323	0.3676
estimated field capacity =	0.3398	0.6781

Peak flow = 317.4955 cu m /s (0.2062657 mm/hr) at 9240. min

Peak sediment discharge = 216.6661 kg/s at 5940. min

Water balance		Sediment balance	
-----		-----	
Rain:	0. cu m	In:	126228200. kg
Inflow:	219410896. cu m	Deposited:	1485436. kg
Infilt:	3570952. cu m	Suspended:	447926. kg
Stored:	1702452. cu m	Out:	124287696. kg
Out:	214133104. cu m	Error:	0.01 %
Error:	0.00 %		

88 elements Processed

Event Volume Summary:

Rainfall	114.0000 mm	631710208. cu m
Plane infiltration	59.5119	329774400.
Channel infiltration	7.7877	43154080.
Interception	0.3727	2065069.
Storage	1.2764	7072848.
Outflow	38.6430	214133104.

Error (Volume in - Volume out - Storage) = 6 percent!

Time step was adjusted to meet Courant condition

Total watershed area = 554131.9 ha

Sediment yield = 224.2927 kg/ha

Sediment yield by particle class:

Particle size (mm)	0.250	0.033	0.004
Yield (kg/ha)	41.7556	73.4560	109.0812
% of total yield	18.62	32.75	48.63