



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS HÍDRICAS

TESIS DE MAESTRIA:

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN MODELO HIDROLÓGICO
DISTRIBUIDO EN GRANDES CUENCAS DE SISTEMAS TÍPICOS Y
ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.
CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL ARROYO FELICIANO.**

Por: Ing. María Inés Mastaglia

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención
del grado académico de:

MAGISTER EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Directora: Mag. Graciela Viviana Zucarelli

Co-Directora: Mag. Graciela Pusineri

Santa Fe, Argentina

Julio 2014



ACTA DE EVALUACIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

En la ciudad de Santa Fe, a los veinticinco días del mes de julio del año 2014, se reúnen en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral los miembros del Jurado designado para la evaluación de la Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos titulada **“Evaluación del desempeño de un modelo hidrológico distribuido en grandes cuencas de sistemas típicos y análisis del efecto de la discretización espacial. Caso de estudio: cuenca del Arroyo Feliciano”**, desarrollada por la Ing. María Inés MASTAGLIA, DNI N° 14.718.114. Ellos son, el Dr. Gerardo Riccardi, el Mag. Carlos Scioli y la Mag. Rosana Hammerly. Se cuenta, además, con las presencias de la Directora de la Tesis, Mag. Viviana Zucarelli, y de la Codirectora de Tesis, Mag. Graciela Pusineri.-----

Escuchada la Defensa Pública y evaluada la Tesis, el Jurado resuelve:

*Aprobo la tesis elaborada y defendida, dado que contiene
contiene relevancia y aporta al conocimiento en el
área del modelado hidrológico en cuencas de sistemas
típicos con el modelo HEC-HMS.
La calificación otorgada a la tesis Ing. María Inés
Mastaglia es 10 (sobresaliente)*

Sin más, se da por finalizado el Acto Académico con la firma de los miembros del Jurado al pie de la presente -----

Dr. Gerardo Riccardi

Mag. Carlos Scioli

Mag. Rosana Hammerly

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas

Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

CERTIFICACIÓN DEL JURADO DE TESIS Y DEL DIRECTOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Santa Fe, 25 de Julio de 2014.

Como miembros del Jurado Evaluador de la Tesis de Maestría titulada *“Evaluación del desempeño de un modelo hidrológico distribuido en grandes cuencas de sistemas típicos y análisis del efecto de la discretización espacial. Caso de estudio: cuenca del Arroyo Feliciano”*, desarrollada por la Ing. María Inés Mastaglia, certificamos que hemos evaluado la Tesis y recomendamos que sea aceptada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. La aprobación final de esta disertación está condicionada a la presentación de dos copias encuadernadas de la versión final de la Tesis ante el Comité Académico de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos.

Dr. Gerardo Riccardi

Mag. Carlos Scioli

Mag. Rosana Hammerly

Santa Fe, 25 de Julio de 2014.

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

Mag. Graciela Pusineri
Codirectora de Tesis

Mag. Viviana Zucarelli
Director de Tesis

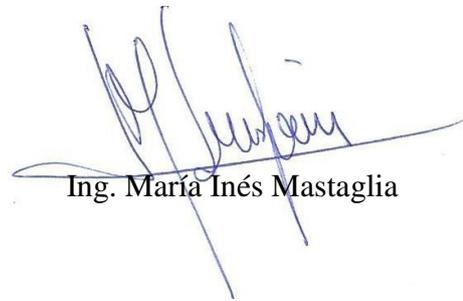
Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y
Ciencias Hídricas
Secretaría de Posgrado

Ciudad Universitaria
C.C. 217
Ruta Nacional N° 168 - Km. 472,4
(3000) Santa Fe
Tel: (54) (0342) 4575 229
Fax: (54) (0342) 4575 224
E-mail: posgrado@fich.unl.edu.ar

DECLARACIÓN LEGAL 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.



Ing. María Inés Mastaglia

AGRADECIMIENTOS

Al cuerpo docente de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral por la dedicación en su actividad como docentes de la maestría y su generosidad en la transmisión de conocimientos y experiencias.

A la Mag. Graciela Viviana Zucarelli, como Directora de Tesis, y a la Mag. Graciela Pusineri, como Co-directora, que me han orientado y estimulado en el desarrollo de este trabajo recibiendo siempre mis consultas con total disposición y actitud colaborativa haciéndome sentir respaldada en todo momento. En esta tarea fue también valiosa la participación de la Mag. Alejandra Arbuet Moraes quien ha colaborado con su experiencia más reciente como tesista.

A los miembros del Jurado de Tesis, Dr. Gerardo Riccardi, Mag. Carlos Scioli y Mag. Rosana Hämmerly, por haber realizado la evaluación de esta investigación de manera minuciosa y responsable que permitieron mejorar el trabajo final a través de sus observaciones.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.2.3 CONTENIDO DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 2: ÁREA DE ESTUDIO	5
2.1 HIDROGRAFÍA	5
2.2 SUELO	7
2.3 VEGETACIÓN	7
2.4 CLIMA	7
2.5 ESTUDIOS EN LA CUENCA DEL ARROYO FELICIANO	9
2.6 JUSTIFICACIÓN DE LA ADOPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	9
CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE	11
3.1 MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE HEC-HMS	11
3.2 EFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS	13
3.3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO APLICADO A LAS PRECIPITACIONES.....	14
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	17
4.1 DESARROLLO METODOLÓGICO	17
4.2 SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA HEC-HMS	18
4.2.1 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN EN EXCESO. MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA.....	18

4.2.2	MÉTODO PARA TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA	20
4.2.3	MÉTODO PARA EL TRÁNSITO DE HIDROGRAMAS EN CAUCE	24
4.3	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	26
4.4	GENERACIÓN DE LA BASE DE INFORMACIÓN ESPACIALIZADA	26
4.4.1	SELECCIÓN DE LAS FECHAS DE LOS EVENTOS MODELADOS	26
4.4.2	MAPAS DE NÚMERO DE CURVA	27
4.4.3	MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA.....	42
4.5	MODELO DISTRIBUIDO DE CUENCA.....	60
4.5.1	EXTENSIÓN HEC-GEOHMS	60
4.5.2	MODELO DE CUENCA DEL ARROYO FELICIANO.....	62
4.6	ARCHIVOS EN GRILLA PARA HEC-HMS	66
4.7	PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO	68
4.7.1	VALORES INICIALES DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	69
4.7.2	AJUSTE DE LOS PARÁMETROS MEDIANTE CALIBRACIÓN	73
4.7.3	VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADOPTADOS	76
4.8	DESARROLLO DEL MODELO AGREGADO	78
4.8.1	VALORES DE CN PARA EL MÉTODO DEL SCS AGREGADO	78
4.8.2	PARÁMETROS DEL MODELO AGREGADO DE CLARK	78
4.8.3	DATOS DE PRECIPITACIÓN	78
4.9	EXPLOTACIÓN DE LOS MODELOS DISTRIBUIDO Y AGREGADO	79
4.9.1	ESCENARIO MARZO 2005	80
4.9.2	ESCENARIO FICTICIO.....	80
4.10	CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	82
4.10.1	MODELO AGREGADO VERSUS DISTRIBUIDO	82
4.10.2	SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL	84
4.10.3	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	84
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		86
5.1	GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIALIZADA.....	86
5.1.1	MAPAS DE NÚMERO DE CURVA	86

5.1.2 MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA.....	87
5.2 RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO	88
5.3 MODELO AGREGADO VERSUS MODELO DISTRIBUIDO.....	90
5.3.1 ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS	90
5.3.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD DEL CN EN LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS.....	92
5.3.3 ANÁLISIS DE LAS MEJORAS DEL MODELO DISTRIBUIDO RESPECTO AL AGREGADO	94
5.4 SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL..	96
5.4.1 EFECTO DEL TAMAÑO DE CELDA EN LA PRECISIÓN DE LOS RESULTADOS.....	96
5.4.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL CN	97
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	101
6.1 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS	101
6.2 GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIALIZADA.....	101
6.2.1 MAPAS DE NÚMERO DE CURVA	102
6.2.2 MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA.....	102
6.3 DESEMPEÑO DEL MODELO DISTRIBUIDO MODCLARK.....	103
6.4 SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL	104
6.5 DIFICULTADES EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DISTRIBUIDO.....	105
REFERENCIAS	107
NOTACIONES	113
ANEXOS	115
ANEXO 1: Mapa forestal de la Provincia de Entre Ríos	1
ANEXO 2: Ocupación del bosque nativo en Entre Ríos	2
ANEXO 3: Mapas departamentales. Clasificación de los montes nativos	3
ANEXO 4: Análisis de fiabilidad de los clasificadores.....	5
ANEXO 5: Análisis exploratorio de los datos pluviométricos.....	11
ANEXO 6: Errores de predicción de los mapas de precipitación.....	21
ANEXO 7: Procedimiento para la creación de archivos en grilla para HEC-HMS	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación de la cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina	5
Figura 2.2: Red hidrográfica en la cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina	6
Figura 2.3: Caudales medios mensuales del Arroyo Feliciano en estación Paso Medina	6
Figura 2.4: Precipitaciones medias mensuales en la cuenca del Arroyo Feliciano	8
Figura 4.1: Modelo de Clark. Histograma Área Tiempo.....	21
Figura 4.2: HTA Sintético (HEC, 1990).....	22
Figura 4.3: Modelo conceptual del método de Clark.....	23
Figura 4.4: Almacenamiento por prisma y cuña en tramo canal (Chow et al., 1994)	24
Figura 4.5: Fotos representativas de los usos del suelo (Fuente: SAyDS, 2007b)	30
Figura 4.6: Imágenes Landsat. Composición color RVA 453	33
Figura 4.7: Digitalización polígonos de entrenamiento.....	33
Figura 4.8: Gráficos de firmas espectrales.....	34
Figura 4.9: Mapa de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano para marzo 2005...	35
Figura 4.10: Mapa de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano para enero 2010..	35
Figura 4.11: Mapa de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano clasificados según sistema Soil Toxonomy	36
Figura 4.12: Mapas de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano según las clases texturales.....	38
Figura 4.13: Mapa de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano categorizados por grupos hidrológicos	40
Figura 4.14: Mapa de CN en la cuenca del Arroyo Feliciano para marzo 2005 (CN ₂₀₀₅)...41	
Figura 4.15: Mapa de CN en la cuenca del Arroyo Feliciano para febrero 2010 (CN ₂₀₁₀) .42	
Figura 4.16: Pluviómetros en la cuenca del Arroyo Feliciano y áreas vecinas	50
Figura 4.17: Distribución temporal de la tormenta del 11 al 13 de marzo 2005	54
Figura 4.18: Distribución temporal de la tormenta del 03 al 06 de febrero 2010.....	54
Figura 4.19: Evento marzo 2005. Mapas de precipitaciones en intervalos de 8 horas	58
Figura 4.20: Evento febrero 2010. Mapas de precipitaciones en intervalos de 8 horas	59
Figura 4.21: Esquema de codificación de las celdas según la dirección de flujo	60
Figura 4.22: Modelo digital de elevación del terreno.....	62
Figura 4.23: Pre procesamiento del terreno. Delimitación de cuencas en el área del MDE	64
Figura 4.24: Modelo distribuido de la cuenca. Tamaño celda 2Kmx2Km.....	65
Figura 4.25: Esquema del modelo hidrológico en HEC-HMS	65

Figura 4.26: Modelos distribuidos de cuenca para distintos tamaños de grilla	66
Figura 4.27: Etapas para la generación de archivos en grilla en formato DSS.....	68
Figura 4.28: Pruebas de calibración. Análisis visual del ajuste.....	75
Figura 4.29: Precipitación antecedente en los escenarios de calibración y validación.....	76
Figura 4.30: Validación. Análisis visual del ajuste	77
Figura 4.31: Polígonos de Thiessen en la cuenca del Arroyo Feliciano.....	79
Figura 4.32: Hietogramas para la subcuenca W80	79
Figura 4.33: Mapa de CN para el escenario ficticio	80
Figura 5.1: Escenario marzo 2005. Hidrogramas observado y modelado	89
Figura 5.2: Escenario marzo 2005. Análisis visual del ajuste de los modelos distribuido y agregado.....	91
Figura 5.3: Escenario ficticio. Hidrograma del modelo distribuido y del agregado para subcuenca W80	93
Figura 5.4: Análisis visual de la correspondencia entre P y DPPE	93
Figura 5.5: Escenario ficticio. Hidrogramas del modelo distribuido con P y CN uniformes versus modelo agregado para subcuenca W80	94
Figura 5.6: HTA aplicado en modelo distribuido y en agregado para la subcuenca W80 ..	95
Figura 5.7: Longitudes de viaje de las celdas para el modelo con grilla de 2Kmx2Km	95
Figura 5.8: Escenario marzo 2005. Hidrogramas observado y simulados para distintos tamaños de grilla.....	97
Figura 5.9: Análisis del procedimiento para la asignación de valores CN cuando se modifican los tamaños de celda	99
Figura 5.10: Escenario ficticio. Hidrogramas de los modelos con distintos tamaños de celda para la subcuenca W80	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Condiciones de humedad antecedente. Rango de montos precipitados	20
Tabla 4.2: Categorías de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano.....	30
Tabla 4.3: Imágenes Landsat seleccionadas	32
Tabla 4.4: Errores de asignación e índices Kappa para los clasificadores evaluados.....	34
Tabla 4.5: Porcentajes de los tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano clasificados según sistema Soil Toxonomy	37
Tabla 4.6: Porcentajes de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano para las distintas clases texturales	38
Tabla 4.7: Categorización de los suelos en la cuenca Arroyo Feliciano por grupos hidrológicos	39
Tabla 4.8: Matriz de valores CN para una AMC I.....	41
Tabla 4.9: Datos pluviométricos evento marzo 2005	50
Tabla 4.10: Datos pluviométricos evento febrero 2010.....	52
Tabla 4.11: Errores de predicción mapas precipitación marzo 2005.....	57
Tabla 4.12: Errores de predicción mapas precipitación febrero 2010	57
Tabla 4.13: Valores del coeficiente de almacenamiento y del tiempo de concentración según distintas metodologías	72
Tabla 4.14. Pruebas de calibración. Coeficientes de bondad de ajuste	75
Tabla 4.15: Validación. Coeficientes de bondad de ajuste	77
Tabla 4.16: Análisis del grado de heterogeneidad del CN para los mapas de marzo 2005 y ficticio	81
Tabla 5.1: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste del modelo distribuido	89
Tabla 5.2: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste de los modelos distribuido y agregado	91
Tabla 5.3: Escenarios marzo 2005 y ficticio. Análisis de las DPPE	92
Tabla 5.4: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste para distintos tamaños de grilla	97
Tabla 5.5: Escenario ficticio. DPPE para los modelos de distintos tamaños de grilla	98

RESUMEN

En los últimos años los continuos avances en sensores remotos y en informática han posibilitado disponer y procesar información distribuida de precipitaciones y parámetros de escurrimiento haciendo viable la aplicación de modelos hidrológicos distribuidos. A pesar de ello no se observa un uso creciente de estos modelos, siendo los métodos agregados los de aplicación más frecuente. Para revertir esta situación se juzgó necesario incrementar las investigaciones sobre los modelos distribuidos que avalen sus resultados y desarrollen criterios para una aplicación eficiente. Con este propósito, en este trabajo se analizó el desempeño del modelo distribuido ModClark, disponible en el Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingenieros Hidrológicos de Estados Unidos (HEC-HMS).

La implementación se realizó en la Cuenca del Arroyo Feliciano en la Provincia de Entre Ríos para dos eventos con información de precipitación y caudales. Los datos de precipitación fueron obtenidos de la red pluviométrica de la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos y distribuidos espacialmente mediante aplicación de métodos geoestadísticos, lo que permitió confirmar la aplicabilidad del modelo distribuido en zonas donde no se cuenta con datos de lluvia provenientes de radar. La distribución espacial del Número de Curva (CN) se realizó en base al análisis de la cobertura de los suelos mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales combinado con el mapa de tipo de suelos desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

El desempeño del modelo distribuido ModClark se evaluó mediante comparación de sus resultados con los del modelo agregado de Clark también disponible en HEC-HMS.

Las simulaciones indicaron que los modelos distribuido y agregado representaron de manera satisfactoria los eventos simulados. La similitud entre los resultados de ambos modelos se explicó por la baja heterogeneidad espacial de los valores de CN. En un escenario ficticio, con valores de CN de mayor variabilidad, los resultados de las simulaciones se diferenciaron, la precipitación en exceso calculada por el método agregado resultó inferior que en el método distribuido.

Las diferencias entre los modelos se dieron principalmente en la etapa de cálculo de la precipitación en exceso mientras que las modificaciones introducidas en ModClark para la traslación de la misma presentaron un efecto insignificante sobre los resultados.

La aplicación más eficiente del modelo distribuido se analizó en función de la correcta selección del tamaño de celda, dimensiones muy pequeñas podrían insumir tiempos de procesamiento excesivos sin mejoras notables en los resultados. Para la determinación del tamaño de celda adecuado se realizó un estudio de sensibilidad del modelo a la discretización espacial. El modelo manifestó muy baja sensibilidad cuando los valores de CN presentaron baja heterogeneidad espacial. En situaciones con mayor variabilidad, el tamaño apropiado de celda fue el que coincidió con la resolución espacial del mapa de CN, tamaños menores incrementaron los tiempos de procesamiento sin influencia en los resultados.

La mayor dificultad en la implementación del modelo distribuido surgió en la generación de los archivos en grilla en formato de HEC-HMS (*.DSS), en su resolución se desarrolló un procedimiento que se documentó en este trabajo para facilitar la aplicación de ModClark a posibles usuarios futuros.

ABSTRACT

In the last years the continuous advances in remote sensing and in informatics have made possible to provide and to process information distributed rainfall and parameters runoff making feasible the application of distributed hydrological models. Despite this, there is not a growing use of these models, being the lumped methods which are usually applied. To reverse this situation is deemed necessary to increase research on distributed models to validate their results and develop criteria for an efficient implementation. For this purpose, in this paper was analyzed the performance of ModClark distributed model which available on the Hydrologic Modeling System of the Hydrologic Engineering Center (HEC-HMS).

The implementation was done in the Feliciano Stream Basin in the Province of Entre Rios for two events with information of rainfall and discharge. The precipitation data were obtained from the rainfall network of Hydraulics Direction and were distributed spatially by application of geostatistical methods which confirmed the applicability of distributed model in areas where there is no rainfall data from radar. The spatial distribution of the curve number (CN) was performed based on the analysis of soil cover by supervised classification of satellite images combined with the soil type map developed by the National Institute of Agricultural Technology.

The performance of ModClark distributed model was evaluated by comparing their results with the lumped model of Clark also available in HEC-HMS.

The simulations indicated that models distributed and lumped accounted satisfactorily the modeled events. The similarity between the results of both models is explained by the low spatial heterogeneity of CN values. In a fictitious scenario, with CN values with greater variability, the results of the simulations were different, the excess rainfall calculated by the aggregate method was lower than in the distributed method.

The differences between the models were mainly at the stage of calculating excess rainfall while improvement introduced in ModClark for the translation it had a negligible effect on the results.

The most efficient implementation of the distributed model was analyzed on based to the correct choice of cell size, very small dimensions could consuming excessive processing times without significant improvements in the results. To determine the appropriate size of the cell, a sensitivity study of the model to the spatial discretization was performed. The model exhibited very low sensitivity when the CN values showed low spatial heterogeneity. In situations with greater variability, the proper cell size was the one that coincided with the spatial resolution of the CN map, smaller sizes increased processing times without influence on the results.

The main difficulty in implementing the distributed model emerged in the generation of files in grid format HEC-HMS (*.DSS), in its resolution a procedure were developed and is documented in this paper to facilitate the application of ModClark to potential future users.

Capítulo 1: Introducción

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los procesos hidrológicos generalmente se simulan con modelos matemáticos, siendo los más usados tradicionalmente los del tipo concentrado a escala de subcuenca o también denominados semi-distribuidos. En ellos, las subcuencas son representadas por características geométricas globales y sus parámetros son obtenidos como promedios ponderados arealmente. La precipitación en cada subcuenca es considerada con una distribución espacial uniforme y generalmente los datos provienen de medidores puntuales.

Actualmente, importantes desarrollos en sensores remotos y en informática permiten disponer de modelos digitales de elevación del terreno, elaborar mapas de usos de suelos a partir de imágenes satelitales, estimar precipitaciones distribuidas espacialmente y contar con sistemas de información geográfica y equipos computacionales con capacidad suficiente para procesar y almacenar toda esta información. Esta situación ha alentado el desarrollo de sistemas de modelación hidrológica distribuida que consideran la variabilidad espacial de las características de la cuenca, de sus parámetros y de la precipitación y por lo tanto es de esperar una mejora en los resultados respecto a los modelos agregados.

Sin embargo no se observa una aplicación generalizada de los modelos distribuidos a pesar de que algunos de ellos son de acceso libre y gratuito como el incluido en el sistema de modelación HEC-HMS. Posiblemente se deba a que existen algunas limitaciones en su implementación como son la necesidad de contar con conocimientos en el manejo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), el insumo de un tiempo apreciable para el procesamiento y generación de la información espacializada y además los modelos clásicos (agregados) se han venido aplicando durante años lo que ha permitido desarrollar habilidad y validarlos lo que genera cierta resistencia a la implementación de otros modelos menos experimentados.

En este contexto se observa la necesidad de investigar sobre la performance y aplicación de los modelos distribuidos y responder a los interrogantes que surgen al momento de decidir su implementación, como son:

- La aplicación de un modelo distribuido implica un mayor esfuerzo en la generación de la información respecto a un modelo agregado, ¿Esto es justificado por una mejora en los resultados?

Capítulo 1: Introducción

Este cuestionamiento se presenta en particular en sistemas típicos donde por sus características se pueden aplicar modelos agregados con buenos resultados. No así en sistemas atípicos donde las propiedades bidimensionales del escurrimiento y la posibilidad de tener más de un punto de descarga hacen necesario recurrir a técnicas de modelación no tradicionales.

- Al aplicar un modelo distribuido la cuenca debe discretizarse en celdas cuyo tamaño debe ser definido por el usuario. Un tamaño de celda demasiado grosero implica pérdidas en la información pero un tamaño demasiado fino puede hacer al modelo ineficiente con tiempos excesivos para la preparación de información y cálculo. ¿Cuál es el tamaño adecuado de la celda para que el modelo sea preciso y eficiente?

Frente a estas demandas se propone el presente estudio con la intención de contribuir a la investigación de modelos distribuidos mediante la implementación y análisis de uno en particular aplicado a una cuenca de gran tamaño. Para tal fin se ha seleccionado el modelo ModClark incluido en HEC-HMS por varias razones: HEC-HMS es un sistema de modelación extensamente difundido; desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, institución reconocida mundialmente; es revisado y actualizado continuamente; es de acceso público y gratuito y se han desarrollado paquetes de soft SIG específicos para la preparación de la información requerida por el modelo ModClark.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el desempeño de un modelo distribuido en una cuenca de gran tamaño y el efecto de la discretización espacial sobre los resultados.

1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Evaluar la precisión de los resultados del modelo distribuido ModClark incluido en HEC-HMS en relación a la obtenida con un modelo agregado de igual parametrización (Hidrograma Unitario de Clark) disponible dentro del mismo sistema de modelación, para un mismo evento observado en la cuenca del Arroyo Feliciano.

Examinar la sensibilidad del modelo hidrológico distribuido frente a la variación del tamaño de celda.

Capítulo 1: Introducción

Analizar las posibles dificultades durante la implementación del modelo distribuido, desarrollar las soluciones y documentar los procedimientos aplicados.

1.2.3 CONTENIDO DE LA TESIS

El presente documento de tesis se estructuró en seis capítulos que se ordenan acorde a la cronología del desarrollo del estudio y siete anexos con información que complementa lo descrito en los capítulos. Los trabajos consultados y citados en el texto de los capítulos se consignan en la sección REFERENCIAS y las siglas empleadas se detallan en NOTACIONES.

Una breve descripción de los contenidos de los diferentes capítulos se realiza en los párrafos siguientes:

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las motivaciones que llevaron a la propuesta del tema de tesis y se plantean los objetivos generales y particulares a alcanzar.

Capítulo 2: AREA DE ESTUDIO

Se presenta una descripción de las características de la cuenca de estudio, su hidrografía, los tipos de suelos presentes, la vegetación típica y el clima. Se hace referencia a otros estudios desarrollados en investigaciones de la FICH en la misma cuenca y se exponen los criterios que justifican la adopción del área para la presente tesis.

Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE

Se destacan los aspectos más relevantes de los estudios antecedentes revisados vinculados a los diferentes temas tratados en la tesis. Se analizan investigaciones en las que se aplicó el método ModClark, otras orientadas al análisis del efecto de la discretización espacial en modelos hidrológicos distribuidos y otras que permitieron juzgar la aplicabilidad del método geoestadístico para la distribución espacial de la precipitación.

Capítulo 4: METODOLOGÍA

Se describen las características del sistema de modelación, los métodos aplicados en la modelación hidrológica, los procedimientos para la implementación de los modelos distribuido y agregado, la información utilizada y su procesamiento, las técnicas empleadas en la generación de los mapas distribuidos de CN y precipitación conjuntamente con la descripción de los productos obtenidos, se desarrolla el proceso de ajuste de los parámetros del modelo y se establecen los criterios para el análisis de los resultados.

Capítulo 1: Introducción

Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se sintetizan los resultados más significativos alcanzados durante el desarrollo del trabajo y se realiza una interpretación de los mismos.

Capítulo 6: CONCLUSIONES

En base al análisis de los resultados se desarrollan, en este capítulo, las conclusiones que permitieron dar cumplimiento a los objetivos planteados.

 Capítulo 2: Área de estudio

CAPÍTULO 2: ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, indicada en Figura 2.1, es la cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en la Estación Paso Medina, abarca una extensión de unos 5.500 km², se ubica en el Noroeste de la provincia de Entre Ríos y se extiende por tres departamentos: Federal, Feliciano y La Paz.

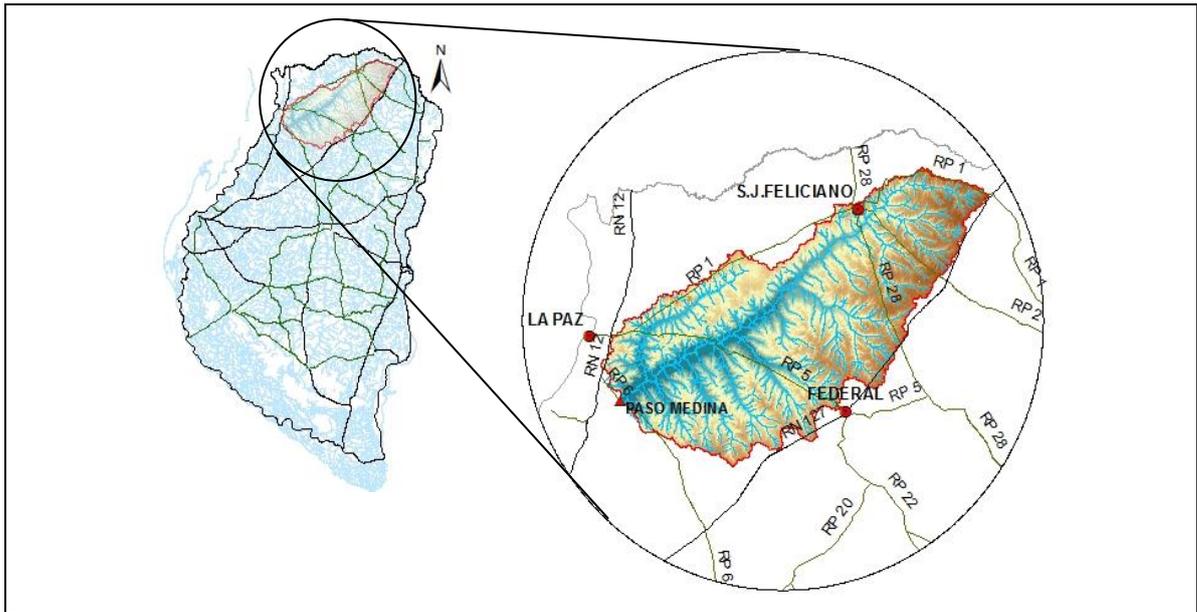


Figura 2.1: Ubicación de la cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina

2.1 HIDROGRAFÍA

El Arroyo Feliciano nace en la loma del Mocoretá y escurre en dirección Noroeste-Sureste para descargar en el Arroyo Alcaraz, el que a su vez es afluente del río Paraná. La longitud del curso es de unos 250 km hasta su descarga y de 200 Km hasta la sección Paso Medina con una pendiente media del 0,026%.

Por su margen izquierda recibe el mayor porcentaje del aporte mientras que por la derecha sólo ingresa un tributario, el Arroyo Estacas, que escurre paralelo al arroyo Feliciano hasta su descarga en el mismo. Los afluentes más importantes se indican en Figura 2.2.

Capítulo 2: Área de estudio

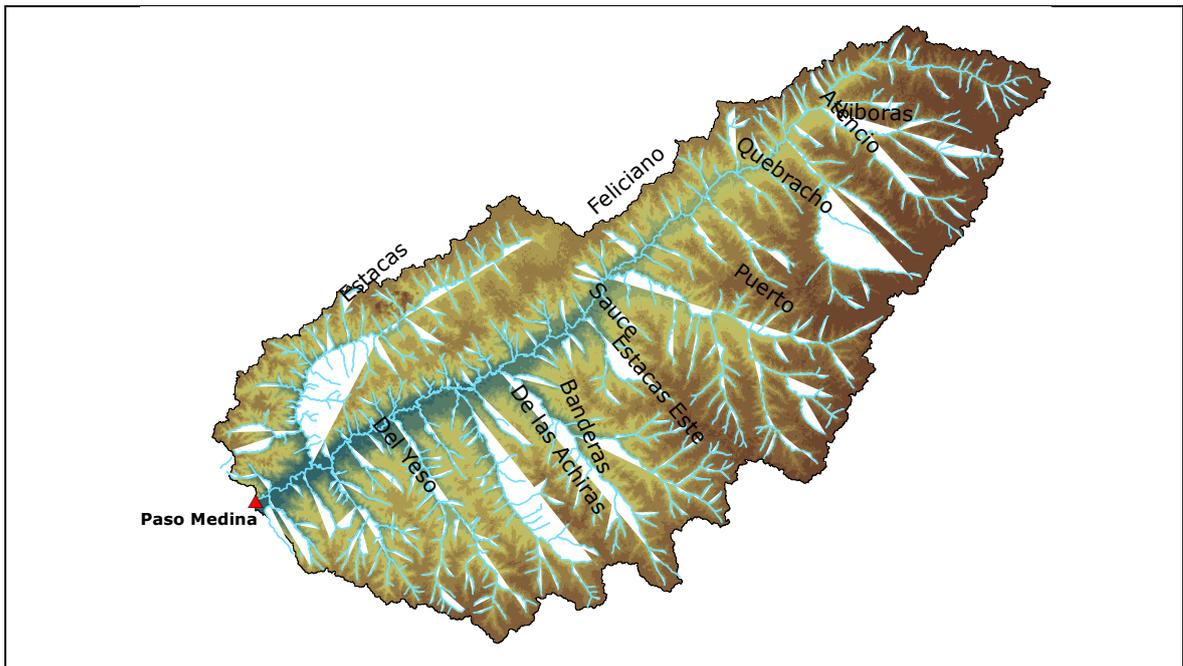


Figura 2.2: Red hidrográfica en la cuenca del Arroyo Feliciano con cierre en Paso Medina

Los caudales del Arroyo Feliciano son medidos en la Estación Paso Medina operada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) desde el año 1975. En base a los registros de la serie 1975-2012 se determinó un módulo de $53 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal máximo de $2180 \text{ m}^3/\text{s}$ registrado en marzo de 1998. Los promedios mensuales se presentan en Figura 2.3, el mes con mayores caudales es abril.

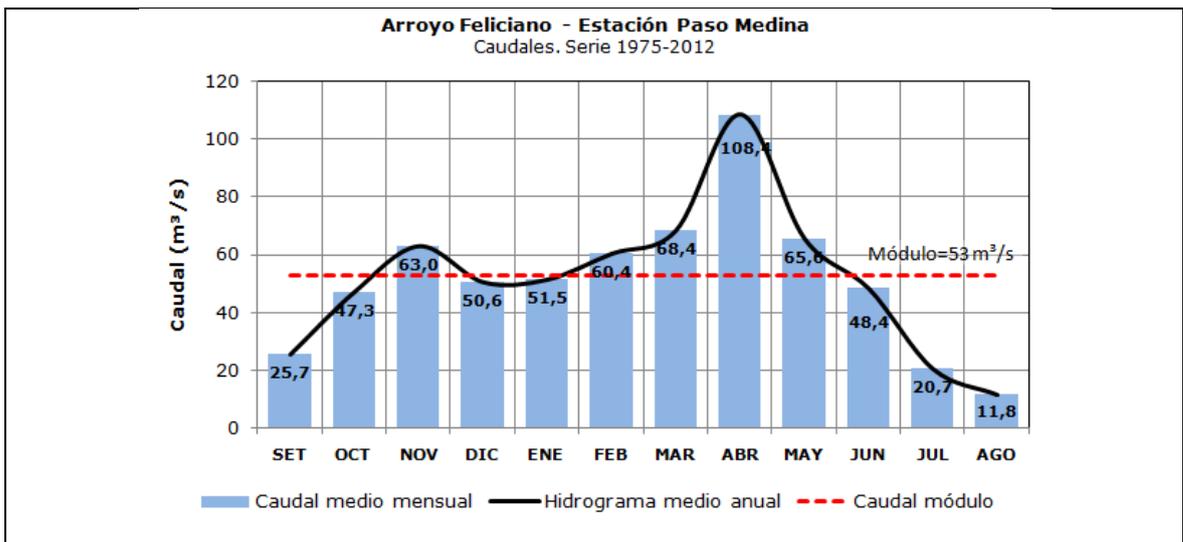


Figura 2.3: Caudales medios mensuales del Arroyo Feliciano en estación Paso Medina

Capítulo 2: Área de estudio

2.2 SUELO

En la cuenca del Arroyo Feliciano predominan los suelos alfisoles y vertisoles y en menor proporción se presentan molisoles e inceptisoles tal como pudo verificarse mediante la información del Atlas de Suelos de la República Argentina elaborado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca conjuntamente con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (SAGyP e INTA, 1990).

De acuerdo a lo descrito en Boschetti et al. (2009), los suelos Vertisoles y Alfisoles están desarrollados sobre limos arcillosos de origen lacustre-palustre, de la Formación Hernandarias y los Molisoles sobre limos calcáreos y loess re transportado de la Formación Tezanos Pintos, mezclados con limos calcáreos de la Formación Hernandarias.

2.3 VEGETACIÓN

Desde el punto de vista fitogeográfico, el área de estudio se ubica dentro del distrito Ñandubay de la Región Forestal El Espinal.

La vegetación del distrito del Ñandubay, de acuerdo a lo descrito por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS, 2007a), se caracteriza por bosques xerófilos dominados por ñandubay y espinillo o aromito (*Acacia caven*). Son generalmente abiertos y están compuestos por un estrato arbóreo bajo (6 a 12 m), con algunos ejemplares aislados que excepcionalmente sobrepasan los 12 m de altura. Suelen desarrollarse bosques mixtos de varias especies en sitios donde el drenaje y el tipo de suelo permiten el desarrollo de una vegetación con características más higrófilas. En los albardones y proximidades de los ríos y arroyos la vegetación leñosa es más diversa, rica en especies higrófilas y mesófilas, formando selvas en galería en arroyos angostos.

La mayor parte de los bosques nativos de la región espinal de la provincia se encuentra dentro de la cuenca del Arroyo Feliciano y corresponde a bosques en galerías, el resto de la cuenca está destinada a actividades agropecuarias (Visentín, 2010).

2.4 CLIMA

Climatológicamente la cuenca se encuentra dividida en dos regiones, el sector norte pertenece a la región de clima subtropical húmedo de llanura y el sur a la del templado húmedo de llanura.

Capítulo 2: Área de estudio

La región de clima subtropical húmedo de llanura se caracteriza por inviernos suaves. La amplitud térmica no excede los 13°C y el alto grado de humedad del aire reduce su oscilación diaria. La región de clima templado húmedo de llanura se caracteriza por su condición de planicie abierta, sin restricciones a la influencia de los vientos húmedos del noreste, al accionar de los vientos secos y refrigerantes del suroeste (causantes de los cambios repentinos en el estado del tiempo), y a los vientos del sureste (aire frío saturado de humedad, que da lugar a semanas enteras de cielo cubierto, lluvias y temperaturas muy estables). (Romero, 2013).

La temperatura media anual ha sido calculada por Romero (2013) sobre registros de la Estación Feliciano del Servicio Meteorológico Nacional resultando un valor de 19,1°C y determinándose que el mes más cálido es Enero con 25,4°C y el mes más frío Julio con 12,7°C.

La precipitación media anual en la cuenca, calculada en base a los registros de la red pluviométrica de la Dirección de Hidráulica, es de 1240 mm para la serie 1980-2010, con dos estaciones bien definidas: una lluviosa, primavera-verano, y otra seca, otoño-invierno, como puede observarse en Figura 2.4 elaborada a partir de los datos mencionados. El año hidrológico más lluvioso, en la serie analizada, es 1997-1998 con una precipitación media anual en la cuenca de 2117 mm, mientras que la mayor sequía se registró en 2008-2009 con una precipitación media anual de 804 mm.

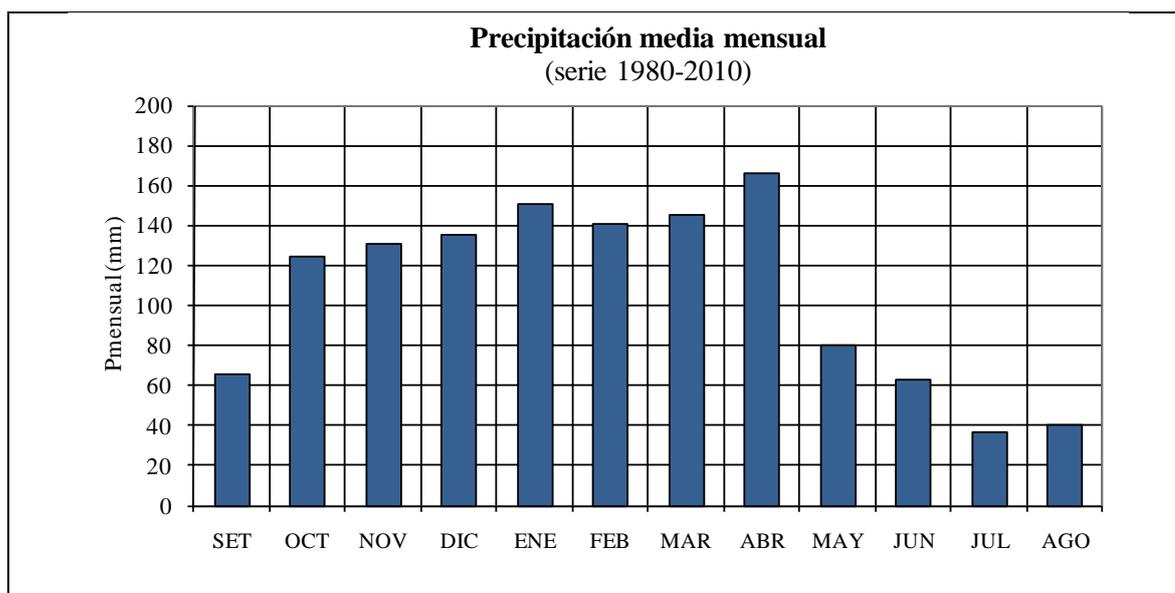


Figura 2.4: Precipitaciones medias mensuales en la cuenca del Arroyo Feliciano

Capítulo 2: Área de estudio

2.5 ESTUDIOS EN LA CUENCA DEL ARROYO FELICIANO

En la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), donde se desarrolla esta tesis, se han realizado investigaciones y tesis aplicadas a la cuenca del Arroyo Feliciano.

Arbuet Moraes (2009) analizó, en su tesis de maestría, los efectos hidrológicos del cambio de uso del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano originado por el aumento de la superficie agrícola en la cuenca en el período 1986/2006. Para el desarrollo del trabajo implementó el modelo hidrológico KINEROS (Woolhiser, 1990) basado en las ecuaciones de onda cinemática unidimensional.

Visentín (2010) en su trabajo de tesis desarrolló una metodología para el manejo de cuencas hidrográficas, con criterios de sustentabilidad, en la cuenca del A° Feliciano, contemplando aspectos hidrológicos, hidrogeológicos y de conservación de los recursos naturales.

Investigadores de la FICH, entre ellos Zucarelli quien dirige esta tesis, han implementado el modelo hidrológico OCINE2 en la cuenca del Arroyo Feliciano (Morín et al., 1989). El modelo simula el escurrimiento de una tormenta mediante la propagación a través de las ecuaciones de onda cinemática en cuenca y cauce.

2.6 JUSTIFICACIÓN DE LA ADOPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la selección del área de estudio se han considerado los siguientes aspectos:

- Es una cuenca medida con una estación en la sección Paso Medina operada por la SSRH con registros hidrométricos desde el año 1975 a la actualidad que posibilita contar con datos para la calibración y validación del modelo.

- Presenta una extensa red de pluviómetros pertenecientes en su mayoría a la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos (DH), 16 estaciones propias de la cuenca y 15 en áreas vecinas. En promedio la cuenca posee un pluviómetro cada 410 Km² lo cual se encuentra dentro de los límites para una red mínima establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (Zucarelli et al., 2002).

- Es una cuenca de gran tamaño que presenta variabilidad espacial de los parámetros y precipitaciones.

- En la provincia de Entre Ríos se han realizado importantes avances en disponibilidad de información espacializada: la DH ofrece en su sitio de Internet capas vectoriales de los cursos de agua, red de pluviómetros y otra información de interés, por

Capítulo 2: Área de estudio

otra parte la Facultad Regional Concordia de la UTN ha elaborado un estudio de regionalización de precipitaciones para toda la provincia presentando los resultados en plataforma SIG (detalles de este trabajo en Zamanillo et al., 2008).

Capítulo 3: Estado del Arte

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo proporciona una síntesis de la literatura que ha sido revisada durante el desarrollo de esta tesis y se organiza en tres secciones relacionadas con los aspectos más relevantes. En la sección 3.1 se tratan las investigaciones antecedentes sobre el modelo hidrológico distribuido ModClark de HEC-HMS aplicado en este estudio. En la sección 3.2 se analizan los estudios que abordaron el tema del efecto de la discretización espacial en diferentes modelos hidrológicos distribuidos justificando la importancia de su análisis para optimizar la aplicación de un modelo. En la sección 3.3 se resumen los trabajos en los que se utilizó el análisis geoestadístico para generar mapas de distribución espacial de precipitaciones y que permitieron respaldar la adopción de dicha técnica en el presente estudio.

3.1 MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO DE HEC-HMS

La mayoría de los estudios que han aplicado el modelo hidrológico distribuido de HEC-HMS (ModClark) se han desarrollado en países donde se dispone, desde hace varios años, de radares meteorológicos que permiten contar con datos distribuidos de precipitación con amplia cobertura y con acceso público a dicha información.

Peters and Easton (1996) realizaron la primer aplicación de ModClark motivados por la disponibilidad de datos de precipitaciones provenientes de los radares WST-88D. El estudio se realizó para una cuenca de 4.160 Km² del río Illinois con cierre en el lago Tenkiller en el Centro-oeste de Estados Unidos. Los autores destacaron la capacidad del método para incorporar precipitaciones de radar de manera sencilla.

El Instituto de Recursos Hídricos del Centro de Ingeniería Hidrológica de los EE.UU (CEIWR-HEC, 1996) implementó ModClark en la cuenca del Río Muskingum (Ohio), de un área de 20.818 Km², utilizando datos distribuidos de precipitación provenientes del radar meteorológico NEXRAD. Los resultados evidenciaron que para escenarios de precipitaciones localmente intensas el modelo ModClark con datos de radar resultó más preciso que el modelo agregado con datos de pluviómetros. Esto permitió concluir que el método ModClark tiene un potencial significativo para mejorar los pronósticos.

Lu (2009) desarrolló la modelación de la Cuenca alta del Río Waimakariri en Nueva Zelanda para precipitaciones observadas y de radar. En el trabajo no se pudo

Capítulo 3: Estado del Arte

desarrollar el método de transformación de ModClark por un error en la salida de la conversión del mapa de Número de Curva al formato requerido por HEC-HMS por lo tanto se simuló con la precipitación media areal para cada subcuenca. Debido a la imposibilidad mencionada las conclusiones se basan mayormente en comparar las precipitaciones de radar con las provenientes de pluviómetros. El autor recomienda profundizar en futuras investigaciones el procedimiento para la conversión de los archivos de datos distribuidos al sistema de almacenamiento de datos basado en grilla de HEC-HMS.

Bhattacharya et al. (2012) aplicaron el modelo ModClark en 6 cuencas de Oklahoma y Kansas para 25 tormentas con datos provenientes de radar. Los autores desarrollan una mejora al modelo ModClark incorporando un campo de velocidades espacialmente distribuidas a partir del cual se calcula el tiempo de viaje de cada celda. Se destaca la necesidad de realizar investigaciones futuras para desarrollar un método para tener en cuenta la variabilidad espacial de los coeficientes de almacenamiento lo que actualmente no está incorporado al modelo.

Ghavidelfar et al. (2011) analizaron el modelo distribuido ModClark de HEC-HMS aplicándolo a una pequeña cuenca (67,76 Km²) del río Randam situada en la región semiárida de Irán en el noroeste de Teherán. La distribución espacial de la tormenta simulada se realizó a partir de los datos de tres pluviómetros aplicando el método de interpolación de ponderación inverso a la distancia (IDW). Los resultados del modelo se compararon con los obtenidos con el modelo agregado de Clark para datos promedios de precipitación. Para evaluar la precisión de los modelos se usó como función objetivo la raíz cuadrada del error del caudal pico ponderado. El análisis de los resultados de la calibración y precisión de los modelos revelaron que ambos modelos son capaces de simular la hidrología de la cuenca estudiada en una manera satisfactoria.

Nordstrom (2009) investigó la influencia que tiene la subdivisión de cuencas hidrográficas en los resultados de la modelación distribuida con ModClark. La aplicación se realizó sobre tres cuencas de Texas, dos urbanas de 7 y 60 Km² y una rural también de 60 Km². Se estudiaron seis esquemas de subdivisión variando de dos a nueve subcuencas. Los resultados indicaron que no hay una mejora sustancial en la precisión de los hidrogramas al incrementar el número de subcuencas.

Paudel et al. (2009) validaron el método ModClark comparando los resultados con el modelo agregado de Clark cuando se utiliza en ambos valores de CN idénticos y sin variación espacial. Confirmaron con esto que ModClark es igualmente fiable al modelo

Capítulo 3: Estado del Arte

agregado de Clark cuando se lo implementa adecuadamente. Por otro lado resaltaron la importancia de analizar el escurrimiento de las cuencas utilizando parámetros de pérdidas distribuidos observando que resultan mayores volúmenes de escorrentía y caudal pico que cuando se utiliza un CN promedio.

3.2 EFECTO DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS

Los modelos hidrológicos distribuidos vienen siendo investigados con el objetivo de evaluar sus capacidades y optimizar su aplicación. En particular y en relación al último propósito, ha sido de interés analizar el efecto del tamaño de grilla en los resultados de los diferentes modelos distribuidos.

Guerra Cobián (2007) realizó un análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU (Morin et Paquet, 1995) para distintos tamaños de grillas en 16 cuencas de México a fin de obtener criterios para determinar el tamaño de cuadro óptimo. Los resultados se evaluaron a través del coeficiente de Nash correspondiente a cada simulación observándose que al disminuir el tamaño de grilla no se obtuvieron los valores máximos del coeficiente, sino que, por el contrario, en algunos casos tiende a disminuir.

Wolock y Price (1994) estudiaron los efectos de la escala y resolución de los datos del modelo digital de elevación sobre los resultados del modelo distribuido TOPModel (Beven y Kirkby, 1979). Para ello se lo implementó en 71 cuencas de Pennsylvania, Nueva York y Nueva Jersey utilizando datos de elevación del terreno con dos resoluciones y escalas diferentes, uno de grilla de 30mx30 m (escala 1:24.000) y el otro de 90mx90m (escala 1:250.000), para el cálculo y distribución espacial de un índice topográfico en el que se basa el modelo. Como resultado encontraron que la relación de flujo superficial al flujo total aumenta con la disminución de la resolución espacial.

Johnson et al. (2008) analizaron el efecto de la escala de grilla sobre el modelo distribuido de base física CASC2D-SED (Julien et al., 1995) simulando la respuesta hidrológica y transporte de sedimentos en la cuenca experimental Goodwin Creek en Missisipi para distintos tamaños de celda (30, 90, 150, 210, 270 y 330 m) del modelo de elevación digital del terreno. Se hallaron diferencias sustanciales en los resultados del modelo al variar el tamaño de grilla y se concluyó que los mejores resultados se obtuvieron para tamaños inferiores a 150 m.

Capítulo 3: Estado del Arte

Shrestha et al. (2007) aplicaron el modelo hidrológico distribuido a macro escala OHyMoS (Takasao et al., 1996) en tres cuencas de China con distintas resoluciones de grilla a fin de definir el tamaño de celda más adecuado para la simulación. La precisión del modelo se evaluó mediante comparación de los caudales simulados con los observados. Se definió un índice IC (relación entre el área de la celda y el área de la cuenca) para establecer un criterio de selección de la escala para el modelado en las cuencas no aforadas. Se encontró que los mejores resultados se obtienen para una relación IC=1:10 o superior.

Stenta et al. (2008) estudiaron la influencia del grado de discretización espacial en la respuesta hidrológica de una cuenca de llanura mediante modelación matemática distribuida de la cuenca Arroyo Ludueña (Santa Fe) con el modelo matemático basado físicamente CTSS8 (Riccardi, 2000) y propusieron el escalamiento de parámetros en los esquemas agregados, con la finalidad de obtener respuestas hidrológicas similares entre las diferentes discretizaciones. Los resultados indicaron que se obtiene mayor similitud en la respuesta hidrológica escalando la función de almacenamiento de las celdas respecto al escaleo de los parámetros de resistencia del valle y de los cursos.

Los diferentes estudios comentados demuestran la importancia de analizar el tamaño de celda adecuado en la modelación distribuida, lo cual no puede generalizarse para todos los modelos sino que por el contrario debe ser estudiado para cada uno en particular.

3.3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO APLICADO A LAS PRECIPITACIONES

En los últimos años y gracias a los avances de los sistemas de información geográfica ha sido posible aplicar métodos de interpolación con base geoestadística. Esta técnica, a diferencia de la estadística clásica, tiene en cuenta la correlación espacial entre los valores observados para estimar la variable en un punto no medido del espacio. Esta particularidad ha despertado el interés como método para optimizar la interpolación de datos con dependencia espacial desarrollándose numerosas investigaciones de las cuales se citan las de interés para el presente estudio que es su aplicabilidad a datos pluviométricos.

Méndez Venegas (2008) aplicó el análisis geoestadístico con el propósito de estimar la distribución de la precipitación acumulada en una hora para una tormenta en particular en el valle de la Ciudad de México usando mediciones puntuales y compararlas con datos de imagen de radar meteorológico. En el estudio se concluyó que cuando se

Capítulo 3: Estado del Arte

tienen redes de monitoreo suficientemente densas el uso del Kriging Ordinario produce estimaciones bastante precisas aunque se mejoran las mismas aplicando el Cokriging Ordinario con un modelo de correogionalización lineal usando mediciones de pluviómetros y radar. Se resalta además que los procedimientos geoestadísticos deben realizarse ajustándose a la verificación de las hipótesis en las que se basa el método.

Arumi et al. (2009) analizaron el patrón de distribución de las precipitaciones anuales en la cuenca del río Simpson ubicada en la Patagonia Chilena aplicando el análisis geoestadístico combinado con el modelo de elevación del terreno de la cuenca como variable auxiliar ya que la región presenta gran variabilidad orográfica que influye sobre la precipitación. Los resultados del análisis fueron satisfactorios obteniéndose isohietas que representaron la pluviometría de la zona de mejor forma que los mapas anteriores obtenidos por interpolación lineal entre estaciones. En lo que respecta al análisis geoestadístico se destacó como una poderosa herramienta de distribución espacial aunque, como cualquier otra herramienta, depende de la calidad y cantidad de la información.

Hämerly et al. (2012), realizaron el análisis de la estructura espacial con métodos geoestadísticos de una tormenta crítica ocurrida en la ciudad de Santa Fe en marzo 2007. Dicha tarea posibilitó la obtención de funciones estadísticas que representaron la variabilidad espacio-temporal de la lluvia y de un trazado más representativo de las isohietas en comparación con el obtenido con métodos tradicionales. En el estudio se señaló la ventaja del análisis geoestadístico en que la interpolación no es automática sino que el usuario interviene mediante el análisis previo de la correlación espacial de los valores observados y la adopción de la función que mejor ajusta, siendo estos pasos fundamentales en la optimización de los resultados.

Gómez et al. (2006) analizaron el uso de técnicas para el estudio de la precipitación a través de la revisión de trabajos realizados sobre el tema. Como resultado concluyeron que los procedimientos estadísticos clásicos aplicados a la interpolación de datos pluviométricos, si bien presentaron resultados aceptables, mostraron ser deficientes en el estudio eficaz de ese fenómeno climático mientras que la geoestadística aplicada en plataformas robustas como por ejemplo los sistemas de información geográfica prometió ser una alternativa muy positiva al estudiar dicho fenómeno.

Saz Sánchez y Serrano (2002) realizaron una evaluación de distintos métodos de interpolación (locales, globales y geoestadísticos) aplicados a valores medios anuales de precipitaciones y temperaturas para un sector central del valle del Ebro (NE España). El

Capítulo 3: Estado del Arte

análisis se llevó a cabo generando los mapas de distribución espacial de dichas variables para cada método y valorando la calidad de la cartografía mediante el cálculo del error medio cuadrático. Se concluyó que los mejores resultados para el caso de la precipitación se obtienen aplicando técnicas geoestadísticas mientras que para las temperaturas el modelo de regresión múltiple presentó mejor comportamiento.

Abbaiah y Krishna Murthy (2007) aplicaron métodos geoestadísticos de interpolación para estudiar la distribución espacial de las precipitaciones mensuales, estacionales y anuales en Andhra Pradesh (India). Para el estudio se utilizaron datos de precipitación de una red de 23 estaciones meteorológicas para el período 1970-2003. Las superficies de precipitaciones se crearon utilizando el método Kriging Ordinario y Co-Kriging, este último se aplicó con el fin de incluir en el análisis la elevación como una covariable aleatoria. La precisión de la cartografía se evaluó mediante la técnica de validación cruzada resultando errores aceptables para la producción de mapas y verificando que la consideración de la elevación no produce una mejora significativa en la predicción.

Las investigaciones mencionadas han demostrado resultados satisfactorios en la aplicación de las técnicas geoestadísticas para la obtención de mapas de distribución espacial de precipitaciones. En algunas de ellas se han comparado los resultados con los obtenidos con técnicas de interpolación de la estadística clásica concluyendo que la geoestadística produce predicciones más precisas.

Capítulo 4: Metodología

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1 DESARROLLO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el sistema de modelación hidrológica HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (HEC-USACE) para simular procesos de transformación precipitación escorrentía de cuencas con drenaje dendrítico. Este software dispone de diferentes métodos para el análisis hidrológico entre ellos modelos agregados y un modelo distribuido que considera la variación espacial de las precipitaciones y de las características del terreno (tipo y uso de los suelos). En la sección 4.2 se describe la estructura y requerimientos de HEC-HMS como así también los modelos incluidos en el mismo que se adoptaron.

Para la implementación del modelo distribuido fue necesario, en primer lugar, generar una base de información espacialmente distribuida para la cuenca de estudio. Se seleccionaron para su desarrollo metodologías novedosas como el análisis geoestadístico y la teledetección que permitieron un mejor aprovechamiento de los datos disponibles y una mayor precisión en su distribución espacial. Estas tareas se desarrollaron mediante la aplicación de software integrados a sistemas de información geográfica que se detallan en la sección 4.3. En la sección 4.4 se describen los datos utilizados para generar la base de información espacializada, los procedimientos aplicados y los productos obtenidos. El esfuerzo y tiempo insumido en esta etapa se valoró considerando que la exactitud de los resultados del modelo distribuido depende en gran medida de la calidad de la información que se le ingresa.

En una segunda etapa se generaron los modelos distribuidos de cuenca para distintos tamaños de grilla aplicando la herramienta HEC-GeoHMS que se describe en el punto 4.5. A cada celda, en que se discretizó la cuenca, se le asignaron los datos de precipitación y suelos a partir de la base de información espacializada anteriormente generada con la particularidad que para ello es necesario transformarla al formato requerido por HEC-HMS, esta tarea se detalla en la sección 4.6.

La etapa siguiente, descrita en la sección 4.7., fue la parametrización del modelo hidrológico para lo cual se evaluaron diferentes expresiones de cálculo de los parámetros realizando corridas para un evento observado para seleccionar aquella que dio el mejor

Capítulo 4: Metodología

ajuste. Los valores adoptados de los parámetros se validaron para otra crecida de magnitud similar a la de calibración.

Por último se implementó un modelo agregado de igual parametrización que el distribuido con la finalidad de comparar los resultados. El desarrollo del modelo agregado se describe en la sección 4.8.

4.2 SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA HEC-HMS

La modelación hidrológica con HEC-HMS consta de dos partes principales: la primera es el cómputo de la precipitación efectiva y la segunda es la transformación de ésta en escorrentía. El modelo incluye, además, la posibilidad de transitar el hidrograma de salida de una cuenca a través de un cauce o un embalse. Este sistema de modelación dispone de diferentes modelos matemáticos para resolver cada una de esas etapas, a continuación se describen los seleccionados para el desarrollo de esta tesis.

4.2.1 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN EN EXCESO. MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS), actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRSC), del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), desarrolló un método para calcular las abstracciones de una tormenta conocido como el método del Número de Curva (CN) que se publicó en 1972 en el Manual de Ingeniería Nacional, Sección 4 – Hidrología y que en la actualidad se presenta en la parte 630 - Hidrología (USDA-NRSC, 2004b) de la nueva versión del Manual.

Para una tormenta la Precipitación en Exceso (PE) es siempre menor o igual al monto precipitado (P). De manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca (Fa) es menor o igual a la retención potencial máxima (S). Existe una cierta cantidad de precipitación para la cual no ocurrirá escorrentía y a la misma se la denomina abstracción inicial (Ia), luego la escorrentía potencial es P-Ia.

El método se basa en que para tormentas simples la relación entre las dos cantidades reales y las dos potenciales son iguales, ésto se expresa con la relación (4.1)

$$\frac{Fa}{S} = \frac{PE}{P - Ia} \quad (4.1)$$

Capítulo 4: Metodología

Donde:

Fa: infiltración acumulada luego de iniciada la escorrentía

S: retención potencial máxima

PE: precipitación en exceso o escorrentía directa

P: precipitación total

Ia: abstracción inicial

Del principio de continuidad resulta:

$$P = PE + Ia + Fa \quad (4.2)$$

Operando entre (4.1) y (4.2) resulta:

$$PE = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (4.3)$$

La expresión (4.3) es la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa aplicando el método del SCS.

El método se basó en una gran cantidad de datos de escurrimiento en parcelas experimentales y cuencas pequeñas de EE.UU. para tormentas de alta intensidad y corta duración (de 24 h de duración y menores). Al analizar los resultados en las cuencas se determinó la relación empírica (4.4) para la estimación de la abstracción inicial.

$$Ia = 0,20.S \quad (4.4)$$

Reemplazando (4.4) en (4.3) se obtiene la expresión (4.5)

$$PE = \frac{(P - 0,20.S)^2}{P + 0,80.S} \quad (4.5)$$

Al representar en gráficas la información de P y PE para las cuencas analizadas por el SCS, éste encontró curvas que fueron estandarizadas mediante la definición de un número adimensional denominado Número de Curva (CN) que se relaciona con la retención potencial máxima por la ecuación (4.6).

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4.6)$$

Donde S está expresada en pulgadas.

Si no se dispone de datos de PE, para estimar el valor de CN pueden utilizarse tablas propuestas por SCS (USDA-NRSC, 2004a), las cuales están en función del tipo de suelo (potencial de escurrimiento), uso y tratamiento del suelo y condición de humedad antecedente (AMC).

Las condiciones de humedad antecedente se definen en el método en función de la precipitación acumulada en los 5 días anteriores y a partir de ello se distinguen tres

Capítulo 4: Metodología

condiciones: seca (I), promedio (II) y húmeda (III) para los valores consignados en Tabla 4.1

Tabla 4.1: Condiciones de humedad antecedente. Rango de montos precipitados

Condición	Precipitación antecedente total en 5 días anteriores [mm]	
	Estación inactiva (fría)	Estación de crecimiento (cálida)
I	<13	<35
II	13 a 28	36 a 53
III	>28	>53

A partir de los datos de CN definidos por el SCS para las distintas AMC se ajustaron las expresiones (4.7) y (4.8) (Chow et al., 1994).

$$CNI = \frac{4,2 \cdot CNII}{10 - 0,058 \cdot CNII} \quad (4.7)$$

$$CNIII = \frac{23 \cdot CNII}{10 - 0,13 \cdot CNII} \quad (4.8)$$

El método puede ser extrapolado para calcular la distribución temporal de la precipitación efectiva a lo largo de una tormenta, considerando a P y PE como variables acumuladas para distintos tiempos.

En HEC-HMS el método se presenta en dos versiones, para un modelo de cuenca de parámetros agregados y para uno distribuido. En el modelo agregado se utiliza un valor CN promedio ponderado por área en cada subcuenca mientras que para el distribuido se debe ingresar el valor del CN para cada celda en la que se subdivide la cuenca.

4.2.2 MÉTODO PARA TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

Obtenida la precipitación en exceso se deberá transformar en escorrentía para lo cual HEC-HMS dispone de varios métodos entre los cuales interesa, para la presente tesis, los basados en el hidrograma unitario de Clark para el modelo agregado (HUClark) y el modificado de Clark para el distribuido (ModClark).

4.2.2.1 MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO DE CLARK

El método HUClark representa el escurrimiento superficial sobre la cuenca por medio de dos procesos:

 Capítulo 4: Metodología

1. Traslación de la lluvia en exceso unitaria hasta la salida de la cuenca, distribuyendo ésta según el Histograma Área-Tiempo (HTA) que se construye a partir de las curvas isocronas que son aquellas que unen los puntos de la cuenca que tienen igual tiempo de viaje hasta la salida (Figura 4.1).

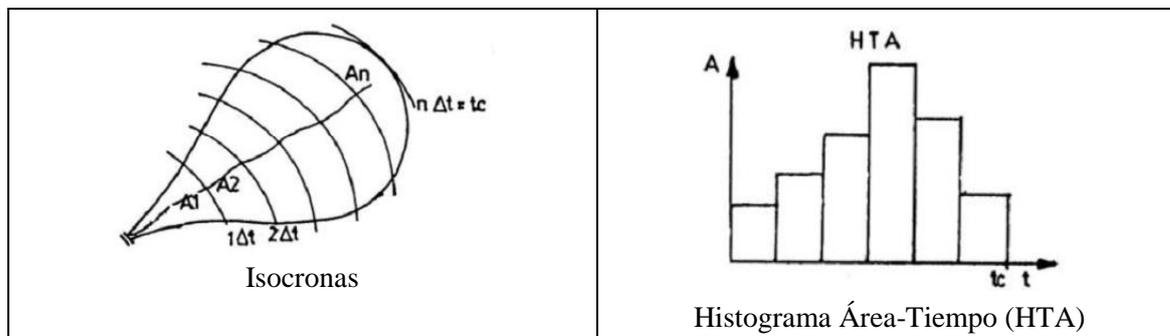


Figura 4.1: Modelo de Clark. Histograma Área Tiempo

El HTA representa el hidrograma unitario instantáneo (HUI) de la cuenca. Asumiendo como hipótesis simplificativa inicial que no existe atenuación en el traslado del escurrimiento hasta la salida de la cuenca, las ordenadas del HUI se pueden aproximar multiplicando el HTA por una intensidad de lluvia unitaria como se indica en la expresión (4.9).

$$u_j^* = A_j \frac{1}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Donde:

u_j^* : ordenada del HUI en el intervalo j

A_j : ordenada del HTA en el intervalo j

$1/\Delta t$: intensidad de lluvia unitaria

Como generalmente no se cuenta con el HTA de la cuenca, HEC desarrolló una función sintética simétrica (Figura 4.2) expresada por las ecuaciones (4.10) y (4.11), a partir de la cual estima el HTA de la cuenca.

$$Ac = 1,414 \cdot T^{1.5} \quad \text{para } 0 \leq T < 0.5 \quad (4.10)$$

$$Ac = 1 - 1,414 \cdot (1 - T)^{1.5} \quad \text{para } 0.5 \leq T < 1.0 \quad (4.11)$$

Donde:

Ac : área acumulada expresada como fracción del área total de la cuenca ($Ac = At/A$)

T : tiempo de llegada a la salida expresado como fracción del tiempo de concentración ($T = t/t_c$)

 Capítulo 4: Metodología

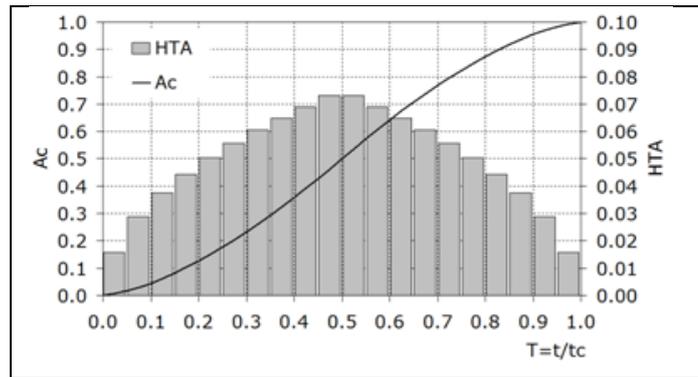


Figura 4.2: HTA Sintético (HEC, 1990)

2. Propagación del hidrograma a través de un embalse lineal ficticio

Para incorporar el efecto de atenuación del hidrograma unitario originado por el traslado del escurrimiento hasta la salida de la cuenca, se propaga la función $u^*(t)$ a través de un embalse lineal ficticio con la ecuación (4.12):

$$u_{t+1} = C_0 \cdot u_{t,t+1}^* + C_1 \cdot u_t \quad (4.12)$$

Donde:

$u_{t,t+1}^*$ son las ordenadas del HUI sin propagar obtenido a partir del HTA y u_t son las ordenadas del HUI propagado

C_0 y C_1 son los coeficientes de propagación que se calculan con las ecuaciones (4.13) y (4.14) respectivamente y donde Δt es el intervalo de tiempo adoptado y R un coeficiente de embalse.

$$C_0 = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad (4.13)$$

$$C_1 = 1 - C_0 \quad (4.14)$$

Del análisis del método se desprende que los parámetros del modelo son el tiempo de concentración que influye en el HTA a partir del cual se obtiene el HUI y el coeficiente de embalse R que incide en la propagación del HUI.

En Figura 4.3 se sintetiza el modelo conceptual del hidrograma unitario de Clark.

Capítulo 4: Metodología

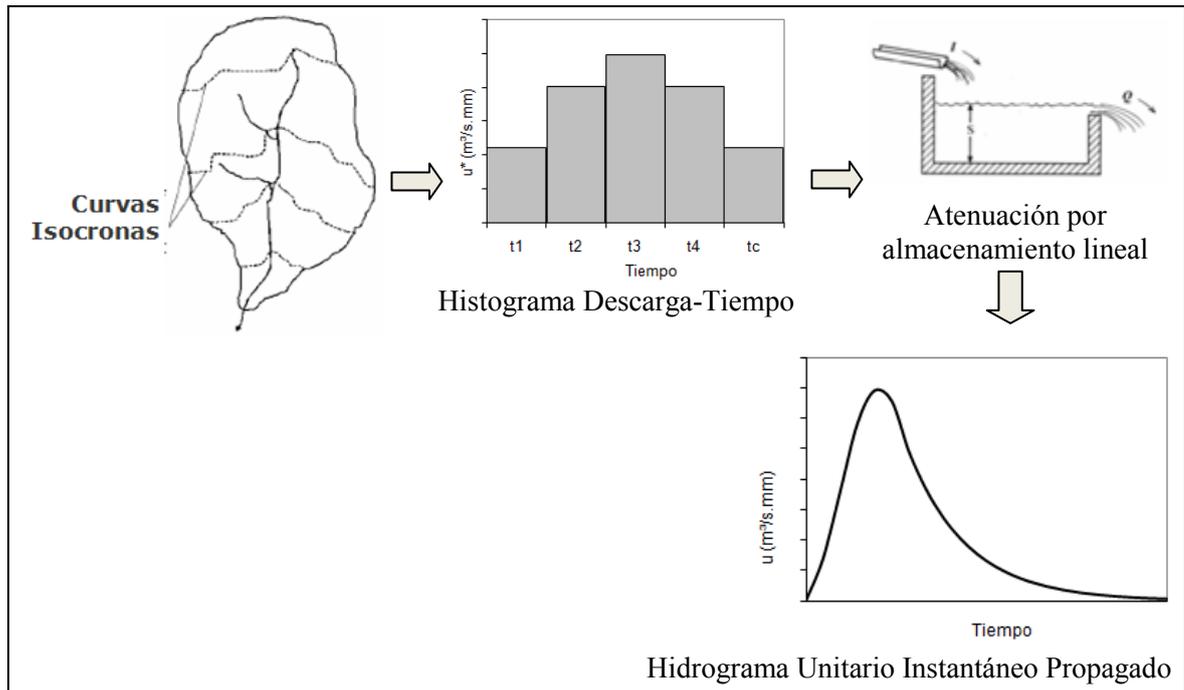


Figura 4.3: Modelo conceptual del método de Clark

4.2.2.2 MÉTODO MODIFICADO DE CLARK

El método ModClark tiene como base, para el cálculo del hidrograma de escurrimiento directo, el modelo HUClark. En esta adaptación una grilla de celdas cuadradas es superpuesta sobre la cuenca y las precipitaciones y pérdidas son calculadas para cada celda. La precipitación en exceso es trasladada hasta la salida de la cuenca en función del tiempo de la celda. Las precipitaciones en exceso retrasadas para cada celda son sumadas y expresadas como una descarga promedio en cada intervalo de tiempo para producir un hidrograma trasladado. El hidrograma trasladado es ruteado a través de un reservorio lineal. (HEC, 1995).

El tiempo de viaje de cada celda es calculado con la ecuación (4.15) deducida a partir de asumir, en forma simplificada, que la velocidad de traslado es uniforme en toda la cuenca.

$$t_{celda} = t_c \cdot \left(\frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \right) \quad (4.15)$$

Donde:

t_{celda} : tiempo de viaje de la celda

t_c : tiempo de concentración de la cuenca

d_{celda} : distancia de viaje de una celda hasta la salida de la cuenca

$d_{m\acute{a}x}$: distancia de viaje para la celda que está más distante de la salida

Capítulo 4: Metodología

El tránsito del hidrograma a través del reservorio lineal es realizado con la ecuación (4.16) donde los coeficientes de propagación son iguales a los aplicados en el método de Clark agregado.

$$O_i = C_o \cdot \bar{I} + C_1 \cdot O_{i-1} \quad (4.16)$$

Donde:

O_i : ordenada del hidrograma de escurrimiento directo en el tiempo i

\bar{I} : ordenada (descarga promedio) del hidrograma trasladado para el intervalo entre los tiempo $i-1$ a i

C_o y C_1 : coeficientes de propagación que se calculan con las ecuaciones (4.13) y (4.14) respectivamente

4.2.3 MÉTODO PARA EL TRÁNSITO DE HIDROGRAMAS EN CAUCE

La propagación de una crecida en un tramo de canal o reservorio es el procedimiento de cálculo que permite determinar el hidrograma a la salida conociendo el hidrograma de entrada, contribuciones laterales y las características del cuerpo de agua. HEC-HMS dispone de modelos de propagación hidrológica que como tales se basan en el concepto de almacenamiento. Para el presente estudio se aplicó el método de Muskingum-Cunge el cual deriva del modelo de Muskingum. Este último, desarrollado por McCarthy (1939) y aplicado sobre el Río Muskingum, se basa en la ecuación de continuidad y en la de almacenamiento el cual es modelado mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma como se esquematiza en Figura 4.4. Combinando ambas ecuaciones y derivando respecto al tiempo McCarthy llegó a la ecuación diferencial (4.17) que expresa el caudal de salida (Q) en función del caudal que ingresa (I) en cada intervalo de tiempo.

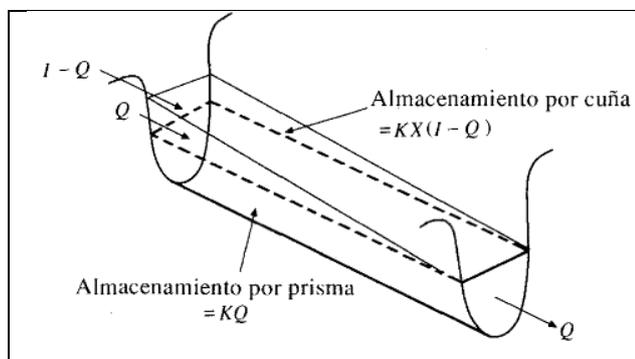


Figura 4.4: Almacenamiento por prisma y cuña en tramo canal (Chow et al., 1994)

$$K \cdot (1 - X) \cdot \frac{dQ}{dt} + Q = I - K \cdot \frac{dI}{dt} \quad (4.17)$$

Capítulo 4: Metodología

Donde: Q es el caudal que sale, I es el caudal que ingresa, K es una constante de almacenamiento en prisma y tiene valor cercano al tiempo de viaje de la onda en el tramo y X es un factor de ponderación del almacenamiento que depende de la forma del almacenamiento por cuña modelado.

Aplicando diferencias finitas se llega a la ecuación (4.18) de propagación del Modelo de Muskingum

$$Q_{t+1} = C_0 \cdot I_{t+1} + C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot Q_t \quad (4.18)$$

Donde C_0 , C_1 y C_2 son coeficientes de propagación que dependen de K , X y del intervalo de tiempo de cálculo Δt .

Para la resolución de la ecuación (4.18) se requiere ajustar los parámetros K y X de una crecida siendo necesario para ello datos los hidrogramas de entrada $I(t)$ y salida $Q(t)$ del tramo de canal, lo cual habitualmente no se dispone.

Cunge (1969) demostró que la ecuación de propagación del modelo Muskingum puede ser considerada como una solución numérica de la ecuación diferencial de onda cinemática para un tramo de canal sin aportes laterales y a partir de ello determinó las dos constantes utilizadas en el método de Muskingum, K y X en función de las características geométricas e hidráulicas del canal y del caudal pico promedio en el tramo con las ecuaciones (4.19) y (4.20). En consecuencia, no resulta imprescindible disponer del hidrograma de salida y de allí la ventaja de la aplicación del método de Muskingum Cunge.

$$K = \frac{\Delta x}{C} \quad (4.19)$$

$$X = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{Q_0}{B \cdot S_0 \cdot C \cdot \Delta x} \right) \quad (4.20)$$

Donde:

Δx : longitud del tramo del cauce considerado

S_0 : pendiente media del fondo del cauce

Q_0 : caudal de referencia, igual al caudal pico promedio en el tramo

B : ancho superficial del canal para Q_0

C : celeridad de la onda estimada a partir de la ecuación (4.21) del modelo de onda cinemática

$$C = \frac{5}{3} \cdot \frac{S_0^{0,3} \cdot Q_0^{0,4}}{n^{0,6} \cdot B^{0,4}} \quad (4.21)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning en el cauce.

Capítulo 4: Metodología

4.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación fue imprescindible trabajar con los SIG para el manejo de datos geospaciales, la generación de información espacialmente distribuida y la creación del modelo de cuenca.

En este trabajo se aplicó fundamentalmente ArcGIS 10 que es un producto de la empresa norteamericana Environmental Systems Research Institute (ESRI) que comprende un conjunto de herramientas para crear, manipular, distribuir y analizar la información geográfica. Además existen extensiones opcionales de los productos de ArcGIS para realizar tareas específicas que no se encuentran en los módulos básicos como son Geostatistical Analyst y HEC-GeoHMS que se utilizaron en esta tesis para generar los mapas de precipitación y el modelo de cuenca respectivamente y que se describirán más adelante.

Otro SIG utilizado, aunque en menor medida, fue IDRISI Selva (Eastman, 2012) que es un sistema enfocado al manejo de imágenes y como tal fue de utilidad para el análisis del uso del suelo en la cuenca a partir de imágenes satelitales que es requerido para la generación de los mapas de CN.

4.4 GENERACIÓN DE LA BASE DE INFORMACIÓN ESPACIALIZADA

La modelación hidrológica distribuida en HEC-HMS requiere disponer de los datos de precipitación y de CN distribuidos en el espacio de la cuenca. Para el caso de estudio esta información debió ser generada a partir de los datos disponibles. En esta sección se detallan los datos geospaciales y procedimientos utilizados y se presentan los resultados obtenidos.

El sistema de referencia cartográfico adoptado fue Posgar 94-zona 5.

Los mapas de precipitación como así también el de CN debieron ser elaborados para las fechas de los eventos que luego se modelaron en HEC-HMS por lo cual el primer paso fue definir las mismas.

4.4.1 SELECCIÓN DE LAS FECHAS DE LOS EVENTOS MODELADOS

Para el presente estudio se modelaron dos eventos, uno para calibración de los parámetros y el otro para validarlos.

La selección de los eventos a simular se realizó en función de un análisis previo de las fechas que cumplían el requisito de disponer simultáneamente de datos de caudales

Capítulo 4: Metodología

observados, precipitaciones medidas en la red pluviométrica de la cuenca, información pluviográfica e imágenes satelitales. Es así que se adoptaron las crecidas del 14 de marzo del 2005 y del 8 de febrero de 2010 ambas con caudales picos en torno a los 600 m³/s.

4.4.2 MAPAS DE NÚMERO DE CURVA

El método del SCS para el cálculo de la precipitación efectiva requiere la determinación del CN el cual depende del uso de la tierra, de la clasificación del suelo desde el punto de vista hidrológico y de la condición de humedad antecedente.

La cuenca del Arroyo Feliciano presenta variabilidad espacial tanto en el uso como en el grupo hidrológico del suelo y por lo tanto el CN varía de una posición a otra. Para la determinación de su valor en los distintos puntos del espacio fue necesario generar los mapas de CN distribuido para lo cual previamente se produjeron los mapas distribuidos de usos del suelo en cada fecha a modelar y de los grupos hidrológicos.

4.4.2.1 MAPA DE USOS DEL SUELO

4.4.2.1.1 Análisis del Uso de los Suelos en la Cuenca del Arroyo Feliciano

La cuenca del Arroyo Feliciano se ubica dentro del distrito Ñandubay de la Región Forestal El Espinal.

La vegetación del distrito del Ñandubay se caracteriza por bosques xerófilos dominados por ñandubay y espinillo. En las proximidades de los arroyos la vegetación forma selvas en galería.

De acuerdo al Mapa Forestal de la Provincia de Entre Ríos (ver ANEXO 1) del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos (SAyDS, 2002), la cuenca del Arroyo Feliciano está cubierta por:

Arbustal: tierras cubiertas por arbustos (plantas boscosas perennes sin una copa definida y con una altura que no alcanza 7 m) y contiene a menudo árboles aislados o en pequeños manchones.

Bosques en galería: rodales que forman una franja estrecha a lo largo de los ríos.

Tierras agropecuarias: conjunto de tierras agrícolas y/o pecuarias de diversos niveles de desarrollo. Comprende igualmente intrusiones de carácter puntual en medio de las Tierras Forestales.

Brizuela et al. (2003), realizaron un mapa de áreas de bosques nativos y selvas ribereñas en la Provincia de Entre Ríos (ANEXO 2) distinguiendo las categorías: “bosque

Capítulo 4: Metodología

natural abierto’, “bosque natural cerrado”, “vegetación ribereña” y “palmar”. En el mismo se observó que el mayor porcentaje del área de bosques en la cuenca del Arroyo Feliciano corresponde a la clase “Abierto”.

En los trabajos de Sabattini et al. (2009a, b, c) se realizó una categorización más detallada del bosque nativo en los departamentos del noroeste entrerriano clasificándolo según su fisonomía, estructura del estrato arbóreo y desarrollo del estrato arbustivo en los siguientes grupos:

Monte nativo estable alto y abierto: estrato arbóreo mayor a los 6 m de altura, cubriendo menos del 50% de la superficie del suelo.

Monte nativo estable alto y cerrado: estrato arbóreo mayor a los 6 m de altura, cubriendo más del 50% de la superficie del suelo

Monte nativo estable bajo y abierto: estrato arbóreo menor a los 6 m de altura presentando una cobertura del suelo menor al 50%.

Monte nativo estable bajo y cerrado: estrato arbóreo menor a los 6 m de altura presentando una cobertura del suelo mayor al 50%.

Sabana: fundamentalmente a las áreas de bañados de altura que presenta una dominancia del estrato herbáceo y en forma de islote o muy aislados el estrato arbóreo representado por el “ñandubay” y el “algarrobo negro”. Son zonas sumamente abiertas, que por lo general han sido utilizadas para el cultivo del arroz, por lo que es común encontrar represas de gran magnitud. El campo naturalizado en éstas zonas y que por agricultura y luego utilización del pastoreo, hoy domina el pastizal natural se lo considera como “Otras Tierras” en el análisis de zonificación.

Monte selva: estrato arbóreo superior a los 6 m de altura, con una cobertura mayor al 50% de la superficie del suelo, con alta abundancia y riqueza de especies. Se lo observó, fundamentalmente en las riberas del arroyo Feliciano y en otros tributarios menores.

Selva ribereña: formaciones boscosas en albardón de las islas y se extiende a los largo de los cursos de ríos y arroyos, constituyendo “galerías”. La cobertura arbórea es del 100%.

Bañado con monte selva: áreas inundables y anegables caracterizadas por especies palustres representadas por los pajonales.

Los resultados del trabajo se presentaron en mapas de clasificación del monte nativo obtenidos a partir de imágenes satelitales. En ANEXO 3 se presentan los mapas para los departamentos La Paz, Feliciano y Federal donde se ubica la cuenca del Arroyo

Capítulo 4: Metodología

Feliciano. Se observa que en el departamento La Paz se concentra el mayor porcentaje de bosques alterados y tierras con otros usos (chacras, campos naturalizados, forestación y zonas urbanas) clasificadas como “Otras Tierras”.

Para el presente trabajo de tesis también interesa identificar los diferentes usos dentro de las zonas agrupadas como “Otras Tierras”. La cuenca del Arroyo Feliciano se ubica en la Zona Agroeconómica II (Zonificación del Plan de Tecnología Regional INTA Centro Regional Entre Ríos, 2005 mencionado en Tasi, 2009) con un sistema productivo predominantemente Ganadero. En el trabajo de Tasi (2009) se asignó a cada unidad cartográfica del mapa de suelos del INTA de Entre Ríos el uso actual, en particular para la cuenca del arroyo Feliciano se identifica la actividad ganadera como dominante pero en algunas zonas, donde la disponibilidad de agua y aptitud de los suelos lo permiten, se realiza con rotación con cultivos tradicionales (maíz, trigo, lino, soja, sorgo y girasol) y arroz. La zona arrocera se concentra en el departamento Feliciano donde se han construido embalses para riego.

4.4.2.1.2 Categorización de los Usos del Suelo

En función del análisis realizado se establecieron las categorías de usos del suelo indicadas en Tabla 4.2 para la cuenca del Arroyo Feliciano. El agrupamiento se realizó en función del objetivo de la clasificación para el presente estudio que es la determinación del CN.

En Figura 4.5 se presentan fotografías extraídas del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos (SAyDS, 2007b), donde se visualizan las características de las distintas categorías de ocupación en el distrito Ñandubay.

Capítulo 4: Metodología

Tabla 4.2: Categorías de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano

Categoría	Uso	Características
1	Agua	Cuerpos de agua
2	Bosque nativo cerrado y selva ribereña	Formación donde los árboles de distintas alturas y el sotobosque (arbustos) cubren gran parte del terreno.
3	Bosque nativo abierto	Árboles aislados o en pequeños manchones en una matriz de pastos y arbustos.
4	Pastizales	Pasturas con algunos árboles y/o arbustos muy aislados.
5	Cultivos	Soja, trigo, arroz, etc.
6	Suelo desnudo	

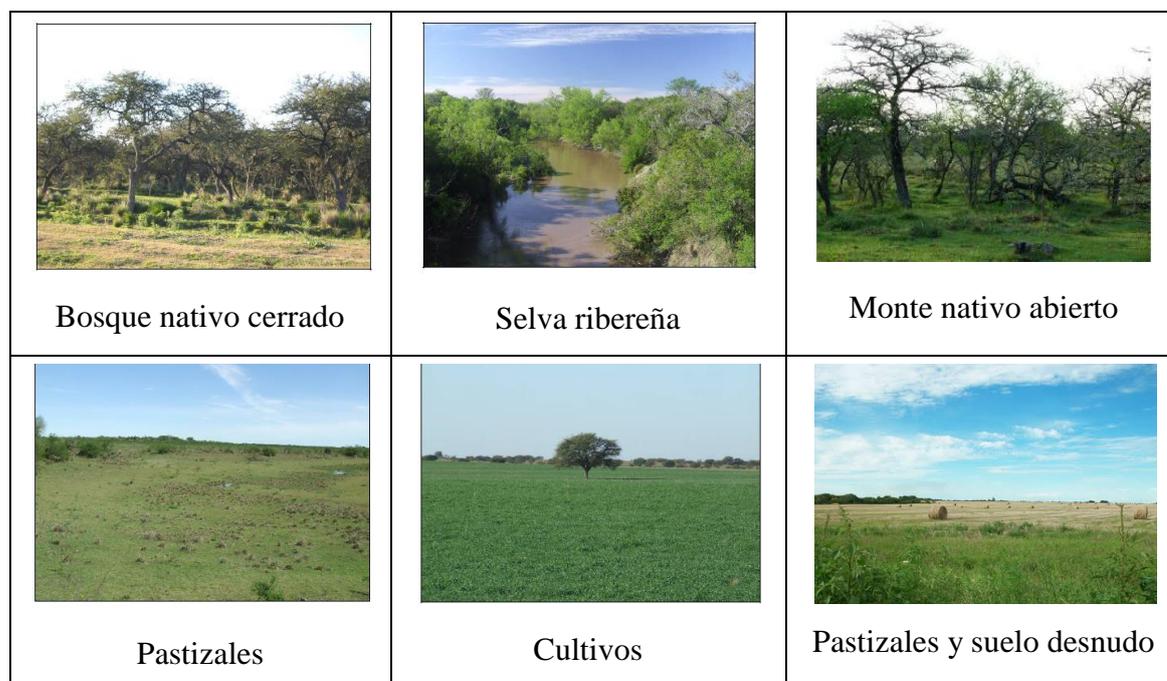


Figura 4.5: Fotos representativas de los usos del suelo (Fuente: SAyDS, 2007b)

4.4.2.1.3 Cartografía Usos del Suelo

4.4.2.1.3.1 Metodología aplicada

Para obtener un mapa con la distribución espacial de las categorías de ocupación del suelo definidas en el punto anterior se realizó el procesamiento digital y clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat para las fechas de interés.

La técnica de clasificación supervisada consiste básicamente en convertir los valores de píxeles, denominados números digitales (ND), de la imagen a categorías

Capítulo 4: Metodología

previamente definidas. El procedimiento requiere la definición de polígonos de entrenamiento para los distintos usos mediante interpretación visual para posteriormente delimitar sobre el resto de la imagen las zonas que se corresponden con ese patrón previamente definido en función del ND.

En esta tesis el proceso de clasificación de las imágenes se realizó con el software Idrisi e involucró las siguientes etapas:

1. Generación de distintas composiciones color que facilitaron la interpretación de las distintas coberturas del suelo.

2. Digitalización de polígonos de entrenamiento identificando zonas representativas de cada categoría de cobertura. Esto se realizó mediante la interpretación visual de las imágenes utilizando como material de apoyo las composiciones color, imágenes google y el análisis de estudios antecedentes detallado en la sección 4.4.2.1.1.

3. Creación de los archivos de firmas espectrales que contienen la información estadística sobre los valores de reflectividad de los píxeles incluidos en cada polígono de entrenamiento.

4. Clasificación de la imagen, operación que se realiza comparando la firma de cada uno de los píxeles con cada una de las curvas de respuesta espectral conocidas, y asignando ese píxel al tipo de cobertura que tiene una firma espectral similar. En esta tarea se utilizaron tres clasificadores distintos, paralelepípedos (PIPED), máxima verosimilitud (MAXLIKE) y mínima distancia (MINDIST).

5. Evaluación de los resultados y selección del clasificador. Se identificaron puntos de la imagen cuyo tipo de cobertura se conoce y se compararon con la categoría asignada por los diferentes clasificadores. En este proceso se obtuvieron, para cada clasificación, la matriz de confusión y el estadístico Kappa y a partir de ello se pudo determinar el clasificador con mayor grado de fiabilidad y adoptar la imagen correspondiente para la generación del mapa de usos de suelos.

6. Aplicación de filtro a la imagen clasificada. Este paso tuvo por finalidad eliminar “ruidos” que son los valores de reflectancia que resultan llamativamente altos o bajos respecto a los valores de los píxeles más cercanos, con la operación de filtrado se reemplazaron por otros valores generados a partir de la interpretación de los valores vecinos.

7. Georreferenciación de la imagen clasificada. La imagen se exportó en Idrisi a formato TIFF y se cargó en ArcGIS donde se re proyectó desde el sistema de coordenadas

Capítulo 4: Metodología

original (WGS84 UTM Zona 21N) al sistema adoptado para el presente trabajo (Posgar 94-zona 5). Se realizó una verificación y ajuste mediante puntos de control materializados por cruces de rutas y ferrocarril cuyas trazas se disponen en formato shape (Fuente: DH Entre Ríos).

4.4.2.1.3.2 Información utilizada

Se utilizaron imágenes correspondientes a la escena path/row 226/81, que cubre la totalidad del área de interés, del satélite Landsat 5 sensor TM. Las imágenes de este satélite tienen una resolución espacial de 30 metros y una resolución temporal de 16 días.

Se buscaron imágenes cuyas fechas de captación sean lo más cercanas posible a los eventos a modelar y que además presenten buena calidad. Las imágenes seleccionadas se listan en Tabla 4.3, las mismas fueron obtenidas a través del sitio de internet del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://glovis.usgs.gov/>).

Tabla 4.3: Imágenes Landsat seleccionadas

Evento	Imagen Landsat 5 TM	
	Escena	Fecha Captura
11 al 13 de marzo 2005	226/81	04 de marzo 2005
03 al 05 de febrero 2010	226/81	13 de Enero 2010

4.4.2.1.3.3 Resultados Obtenidos

La metodología descrita en 4.4.2.1.3.1 se aplicó a las imágenes de marzo 2005 y enero 2010, los productos obtenidos en cada etapa se sintetizan a continuación.

1. Composición Color Imágenes Satelitales Landsat. Se utilizó una composición falso color mejorado con las bandas 4, 5 y 3 (RVA 453) para la distinción visual de las distintas categorías de uso. Las imágenes compuestas se presentan en Figura 4.6.

Capítulo 4: Metodología

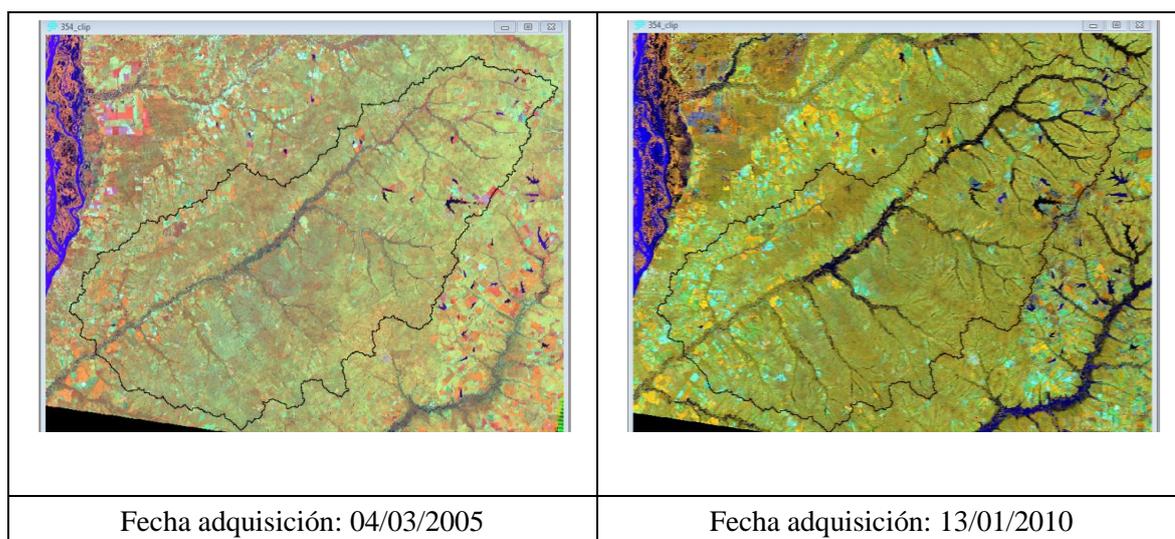


Figura 4.6: Imágenes Landsat. Composición color RVA 453

2. Digitalización de los polígonos de entrenamiento. A modo de ejemplo se presenta en Figura 4.7 la digitalización de los polígonos en los distintos tipos de cubierta en sectores de las imágenes del 2005 y del 2010.

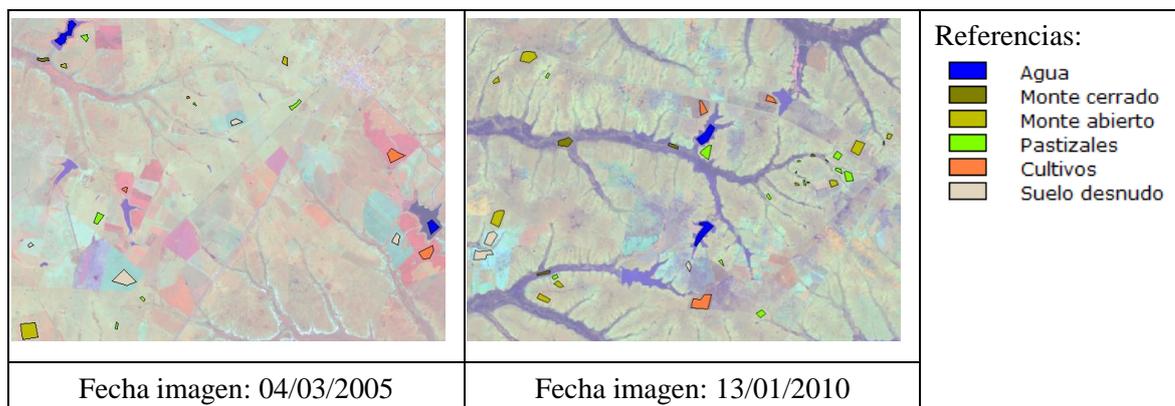


Figura 4.7: Digitalización polígonos de entrenamiento

3. Generación de Firmas Espectrales. A partir del análisis de los píxeles dentro de cada zona de entrenamiento se crearon las curvas de respuesta espectral para cada tipo de cubierta que se representan en Figura 4.8. Las curvas obtenidas fueron contrastadas con curvas espectrales típicas (Chuvienco, 1995) lo que permitió validar el procedimiento de interpretación en la definición de las áreas de entrenamiento.

Capítulo 4: Metodología

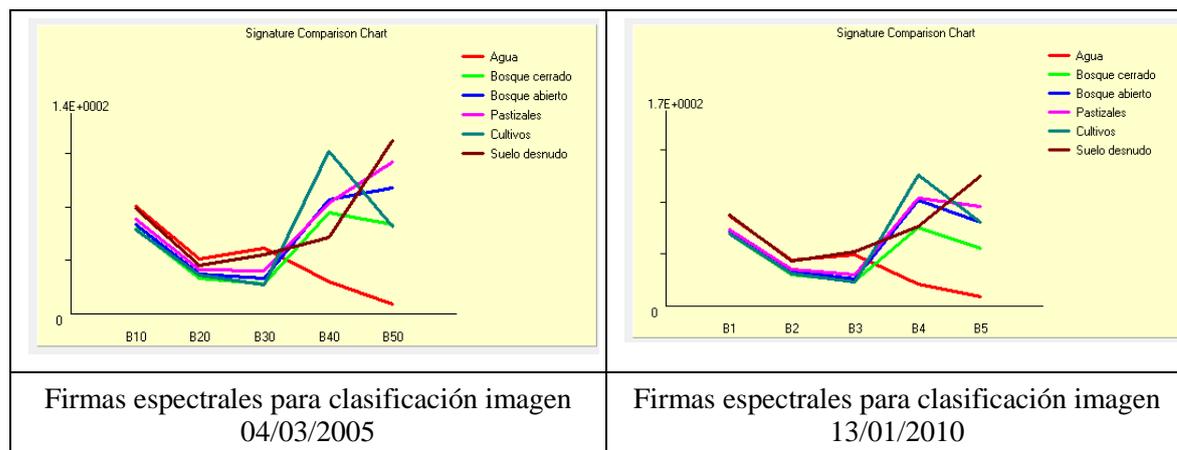


Figura 4.8: Gráficos de firmas espectrales

4. Clasificación de las imágenes y selección del clasificador óptimo

Se realizaron las clasificaciones de las imágenes del 2005 y del 2010 con los clasificadores PIPED, MAXLIKE y MINDIST.

En ANEXO 4 se presentan para cada clasificador la matriz de confusión y el índice de acuerdo Kappa y en Tabla 4.4 se sintetizan los resultados. La clasificación realizada con MINDIST es la que presentó mayor fiabilidad con los menores errores y los mayores valores del coeficiente Kappa, superiores a 0,90 para ambas fechas.

Según la interpretación de los valores del índice de Kappa realizada por Landis y Koch (1977) y descripta en Inácio Rodrigues et al. (2007), resultados mayores a 0,81 corresponden a una concordancia elevada, denominada por dichos autores como casi perfecta. Este valor fue verificado e incluso superado en las clasificaciones realizadas con el clasificador seleccionado.

Tabla 4.4: Errores de asignación e índices Kappa para los clasificadores evaluados

Clasificador	Imagen marzo 2005		Imagen Enero 2010	
	Error	Kappa	Error	Kappa
Maklike	0,0847	0,8975	0,0943	0,8856
Mindist	0,0339	0,9590	0,0566	0,9311
Piped	0,3559	0,5880	0,4528	0,4599

Capítulo 4: Metodología

5. Mapa Usos de Suelos

En Figura 4.9 y Figura 4.10 se presentan los mapas de uso de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano resultantes de la clasificación de las imágenes para las fechas seleccionadas.

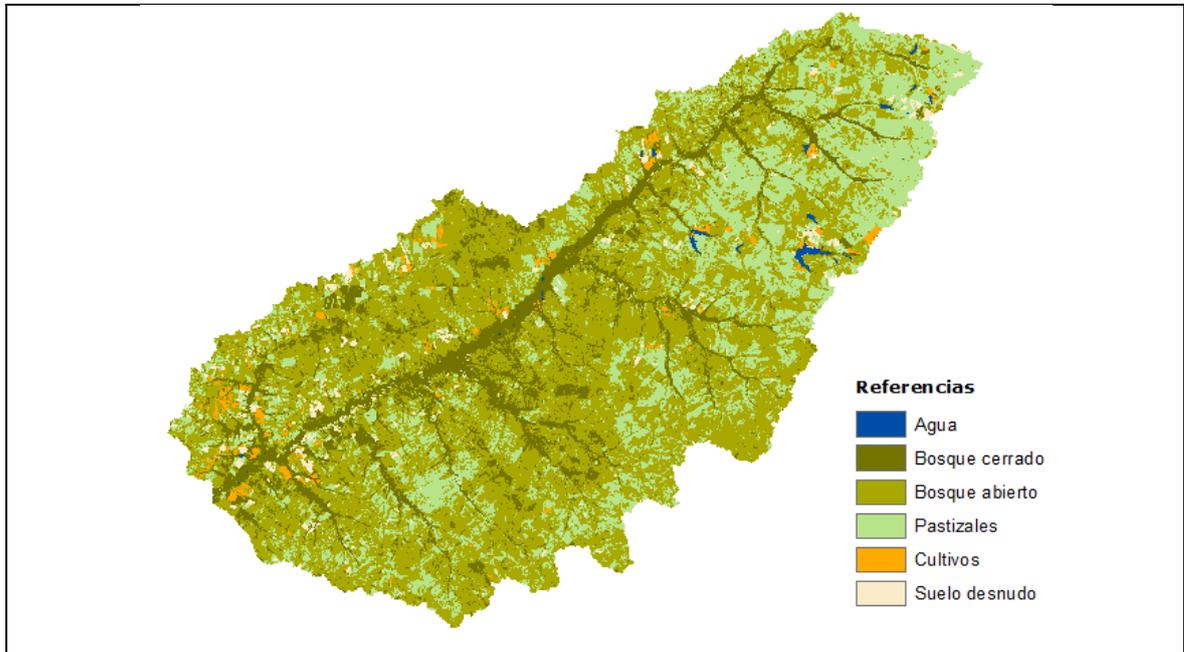


Figura 4.9: Mapa de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano para marzo 2005

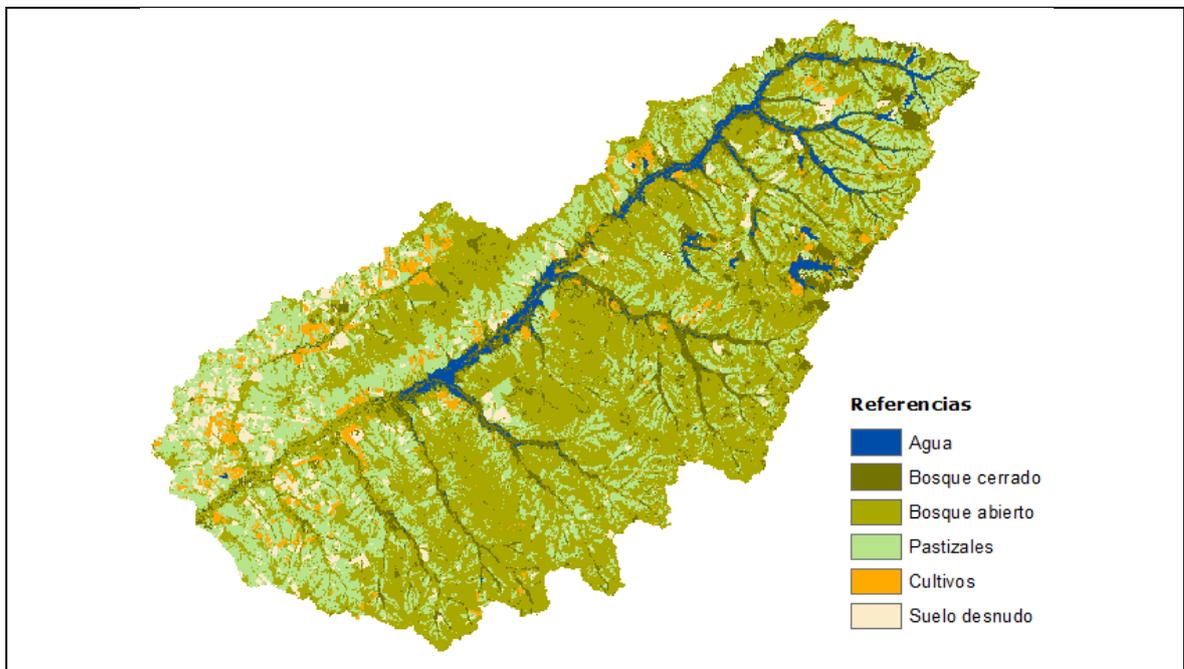


Figura 4.10: Mapa de usos del suelo en la cuenca del Arroyo Feliciano para enero 2010

Capítulo 4: Metodología

4.4.2.2 MAPA GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELOS

4.4.2.2.1 Tipos de Suelos en la Cuenca del Arroyo Feliciano

Los tipos de suelo presentes en la cuenca del Arroyo Feliciano se analizaron en base a la información del Atlas de Suelos de la República Argentina (SAGyP e INTA, 1990) en su versión digital que fuera corregida y ajustada en base a la información original vectorizada a partir de los mapas de suelos provinciales digitalizados en el Instituto de Suelos.

En base a dicha información se elaboró el mapa de los suelos para la cuenca del Arroyo Feliciano (Figura 4.11) clasificados por el INTA según sistema Soil Toxonomy (Soil Survey Staff, 1975). En Tabla 4.5 se indican los porcentajes de ocupación de cada orden de suelo dentro de la cuenca.

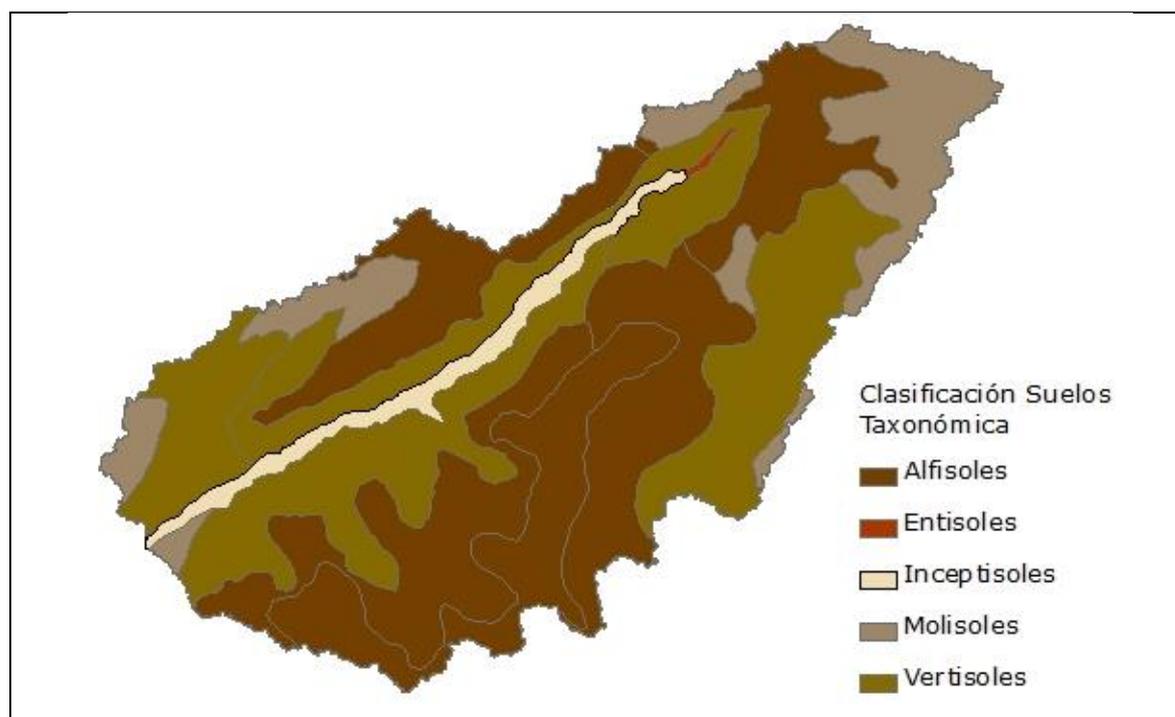


Figura 4.11: Mapa de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano clasificados según sistema Soil Toxonomy

 Capítulo 4: Metodología

Tabla 4.5: Porcentajes de los tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano clasificados según sistema Soil Toxonomy

Orden	Grupo	Textura	% por grupo	% orden en cuenca
ALFISOLES	Ocracualfes típicos	Franca limosa	16.7%	46.1%
	Ocracualfes vérticos	Franca limosa	29.3%	
VERTISOLES	Peludertes argiacuolicos	Franco arcillo limosa	14.4%	36.2%
	Peludertes argicos	Franco arcillo limosa	5.6%	
	Peludertes argiudolicos	Franco arcillo limosa	16.3%	
MOLISOLES	Argiacuoles vérticos	Franco arcillo limosa	9.6%	13.7%
	Argiudoles vérticos	Franco arcillo limosa	2.3%	
	Argiudoles acucos	Franca limosa	1.3%	
	Hapludoles fluventicos	Areno franca	0.5%	
ENTISOLES	Haplacuentes típicos anegables	Franco arcillo limosa	0.2%	0.2%
INCEPTISOLES	Halacueptes típicos	Franco arenosa	3.9%	3.9%

Los suelos preponderantes en la cuenca pertenecen a los órdenes de los alfisoles (46%) y de los vertisoles (36%). Los alfisoles se caracterizan por tener sus horizontes superficiales someros muy lixiviados, de colores claros, seguidos de horizontes muy arcillosos. Los vertisoles son suelos con altos contenidos de arcillas plásticas infiriéndoles características particulares, muy duros en seco y muy plásticos y adhesivos cuando están mojados.

En menor proporción se presentan los Molisoles (14%), suelos pardos oscuros, con horizontes superficiales limosos, bien provistos de materia orgánica seguidos por horizontes subsuperficiales densos, arcillosos, poco permeables y penetrables.

En la zona del valle fluvial se encuentran Inceptisoles y Entisoles ocupando entre ambos solo el 4% de la cuenca.

En Figura 4.12 se identificaron las clases texturales observándose que predominan los suelos franco arcillo limosos y franco limosos y en una proporción mucho menor los arenosos. La proporción de cada clase dentro de la cuenca se presenta en Tabla 4.6.

Capítulo 4: Metodología

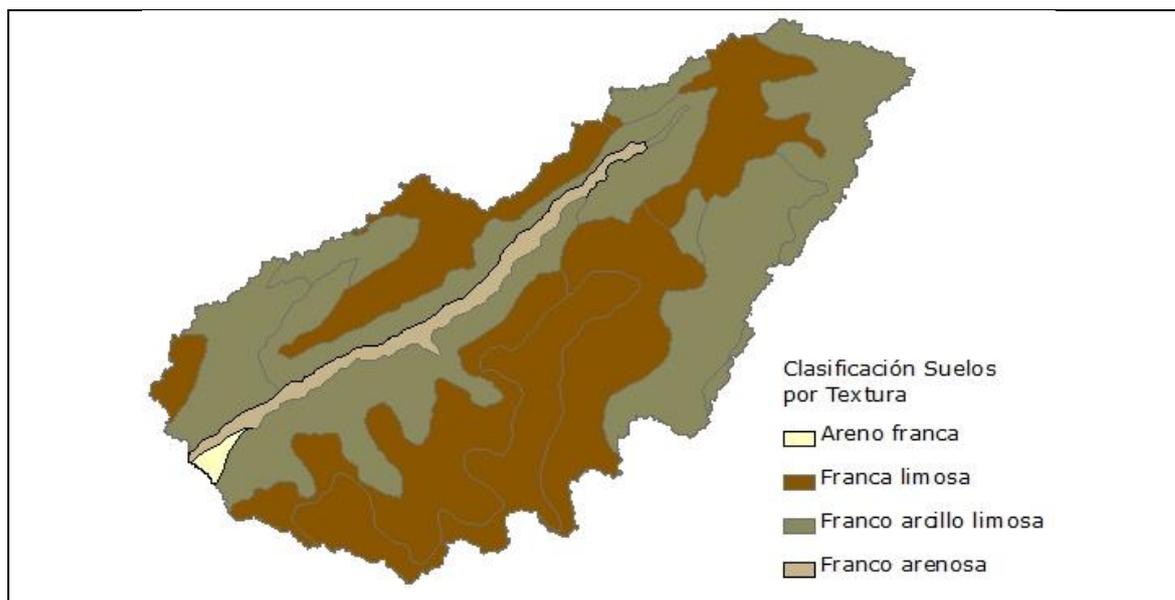


Figura 4.12: Mapas de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano según las clases texturales

Tabla 4.6: Porcentajes de tipos de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano para las distintas clases texturales

Clases texturales	% clase en cuenca
Franco limosa	47.33%
Franco arcillo limosa	48.33%
Franco arenosa	3.87%
Areno franca	0.47%

4.4.2.2.2 Mapa de Grupos Hidrológicos de Suelos

El método del Servicio de Conservación de Suelos define cuatro grupos hidrológicos para categorizar a los suelos desde el punto de vista de su comportamiento frente al escurrimiento. Las características de cada grupo se sintetizan a continuación en base a lo descrito en USDA-NRSC (2009).

Grupo A: son suelos con bajo potencial de escurrimiento cuando están completamente húmedos, el agua es transmitida libremente a través del suelo. Son suelos con menos de 10% de arcilla y más de 90% de arena o grava. Las texturas son grava o arena.

Grupo B: los suelos de este grupo tienen un potencial escurrimiento moderadamente bajo. La transmisión de agua a través del suelo está libre de obstáculos.

Capítulo 4: Metodología

Estos suelos suelen tener entre 10% y 20% de arcilla y 50% a 90% de arena. Tienen texturas areno arcillosa o franco arenoso.

Grupo C: los suelos de este grupo tienen un potencial escurrimiento moderadamente alto. La transmisión de agua a través del suelo está algo restringido. Tienen entre un 20% y 40% de arcilla y menos del 50% de arena. Las texturas son marga, franco limosa, franco arcillo arenosa, franco arcilloso limosa y franco arcillosa.

Grupo D: estos suelos tienen potencial de escurrimiento alto. El movimiento del agua a través del suelo está restringido o muy restringido. Poseen más del 40% de arcilla, menos de 50% de arena y tienen textura arcillosa. Son suelos que se expanden significativamente cuando se mojan.

La agrupación de los suelos de la cuenca del Arroyo Feliciano desde el punto de vista hidrológico se realizó comparando las descripciones de los perfiles edafológicos del mapa de suelos con las características de los grupos hidrológicos resultando lo indicado en Tabla 4.7 y en Figura 4.13.

Los suelos del orden vertisoles de textura franco arcillo limosa se clasificaron como tipo D, los suelos alfisoles y molisoles con textura franco limosa y los entisoles como tipo C, los suelos molisoles con componentes vérticos y textura franco arcillo limosa se consideraron con un 50% en el grupo C y el otro 50% en el grupo D, los suelos inceptisoles de textura franco arenosa se categorizaron como tipo B y los suelos molisoles con textura areno franca, como tipo A.

Tabla 4.7: Categorización de los suelos en la cuenca Arroyo Feliciano por grupos hidrológicos

Orden	Grupo	Clases texturales	%	Grupos Hidrológicos			
				A	B	C	D
Alfisoles	Ocracualfes típicos	Franca limosa	16.7%			100	
	Ocracualfes vérticos	Franca limosa	29.3%			100	
Vertisoles	Peludertes argiacuolicos	Franco arcillo limosa	14.4%				100
	Peludertes argicos	Franco arcillo limosa	5.6%				100
	Peludertes argiudolicos	Franco arcillo limosa	16.3%				100
Molisoles	Argiacuoles vérticos	Franco arcillo limosa	9.6%			50	50
	Argiudoles vérticos	Franco arcillo limosa	2.3%			50	50
Molisoles	Argiudoles acuicos	Franca limosa	1.3%			100	

Capítulo 4: Metodología

Orden	Grupo	Clases texturales	%	Grupos Hidrológicos			
				A	B	C	D
Molisoles	Hapludoles fluventicos	Areno franca	0.5%	100			
Entisoles	Haplacuentes típicos anegables	Franco arcillo limosa	0.2%			100	
Inceptisoles	Halacueptes típicos	Franco arenosa	3.9%		100		

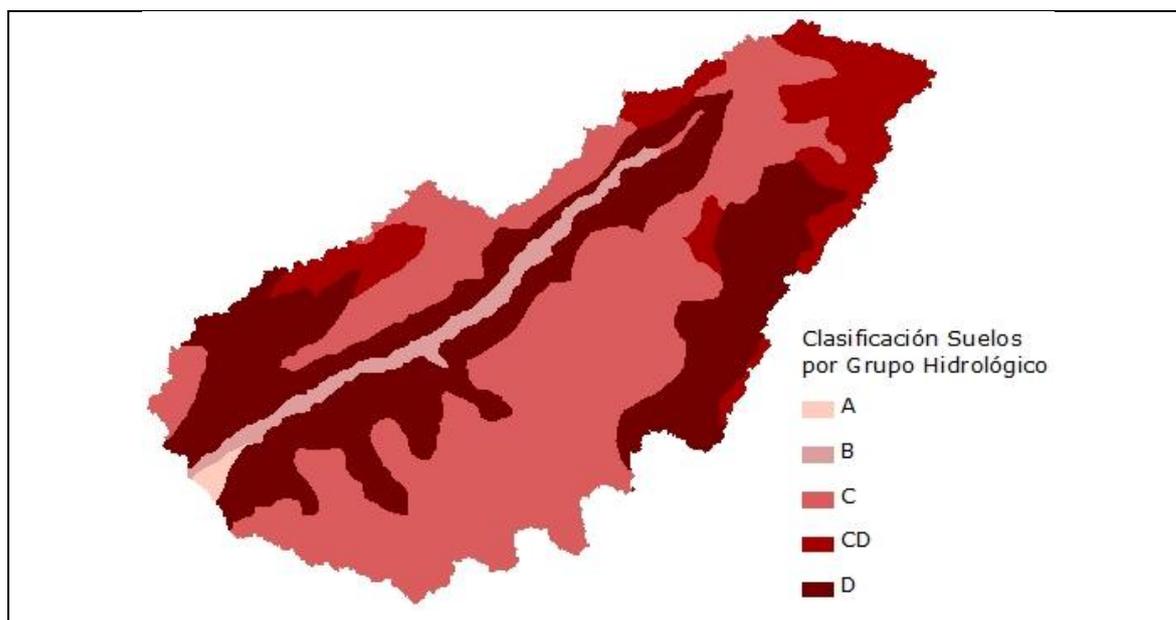


Figura 4.13: Mapa de suelos en la cuenca del Arroyo Feliciano categorizados por grupos hidrológicos

4.4.2.3 MAPA RASTER DE NÚMERO DE CURVA

Para generar el mapa de CN el primer paso fue la unión de los mapas de uso de suelos y de clasificación según grupos hidrológicos en un mapa único vectorial donde a cada polígono se le asoció la información de uso y grupo hidrológico.

El segundo paso fue la creación de una matriz con valores de CN para lo cual previamente se analizó la condición de humedad antecedente para las dos fechas consideradas. A partir de los datos de los pluviómetros en la cuenca del Arroyo Feliciano y zonas vecinas se estimó la precipitación media areal en los 5 días previos ($P_{5ds.ant.}$) al evento. Para la crecida del 14/03/2005 se obtuvo un valor $P_{5ds.ant.}=24$ mm y para la del 08/02/2010 un monto de $P_{5ds.ant.}=23$ mm. Considerando que en ambas fechas la vegetación está en crecimiento la condición de humedad antecedente se clasificó como I (seca) (ver Tabla 4.1). Para la definición de los valores de CN para cada combinación de uso y grupo

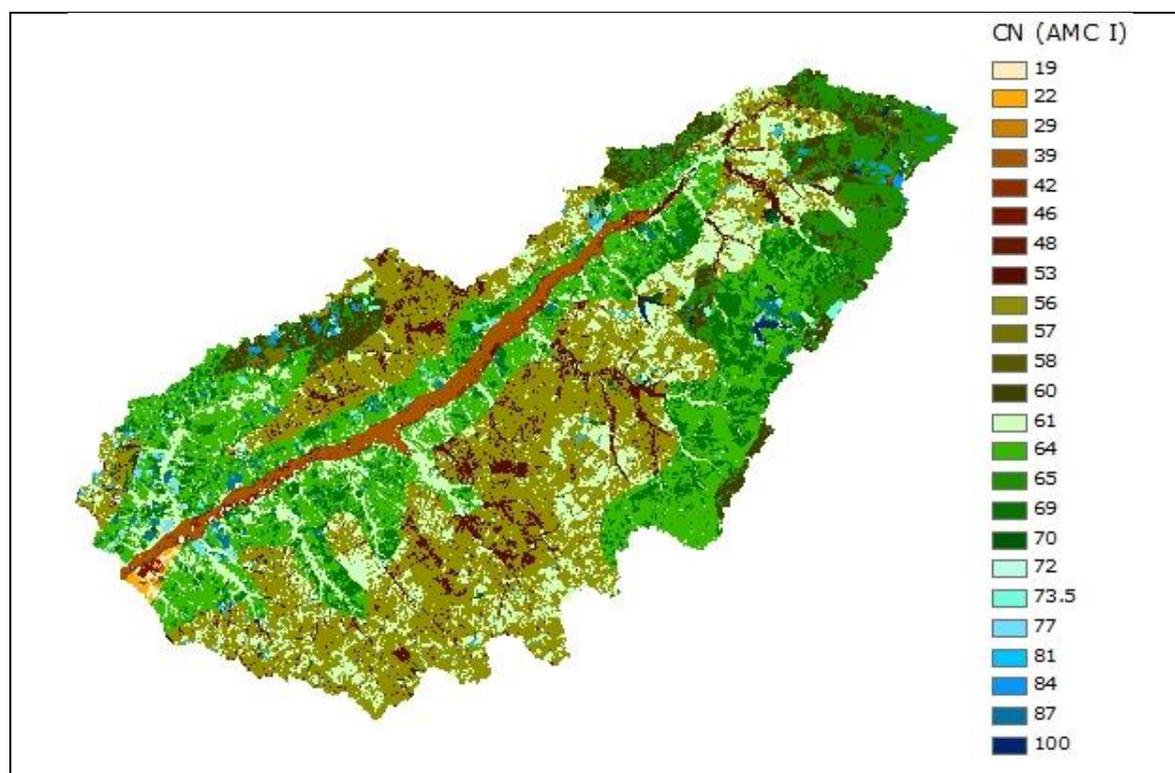
 Capítulo 4: Metodología

hidrológico de suelo se tuvieron en cuenta los recomendados en USDA-NRSC (2004a) para una AMC II. Los valores equivalentes para la condición AMC I se calcularon a partir de la ecuación (4.7), obteniéndose los valores de Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Matriz de valores CN para una AMC I

Categoría	Uso	Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
1	Agua	100	100	100	100
2	Bosque nativo cerrado y selva ribereña	19	39	53	61
3	Bosque nativo abierto	22	42	56	64
4	Pastizales	29	48	61	69
5	Cultivos	46	60	70	77
6	Suelo desnudo	58	72	81	87

Por último, aplicando técnicas SIG, se asoció a cada polígono del mapa de uso y tipo de suelo el valor de CN correspondiente según la matriz de Tabla 4.8 lo cual permitió obtener un mapa vectorial de CN que fue convertido a formato raster resultando los mapas de Figura 4.14 y Figura 4.15 para cada fecha analizada.


 Figura 4.14: Mapa de CN en la cuenca del Arroyo Feliciano para marzo 2005 (CN₂₀₀₅)

Capítulo 4: Metodología

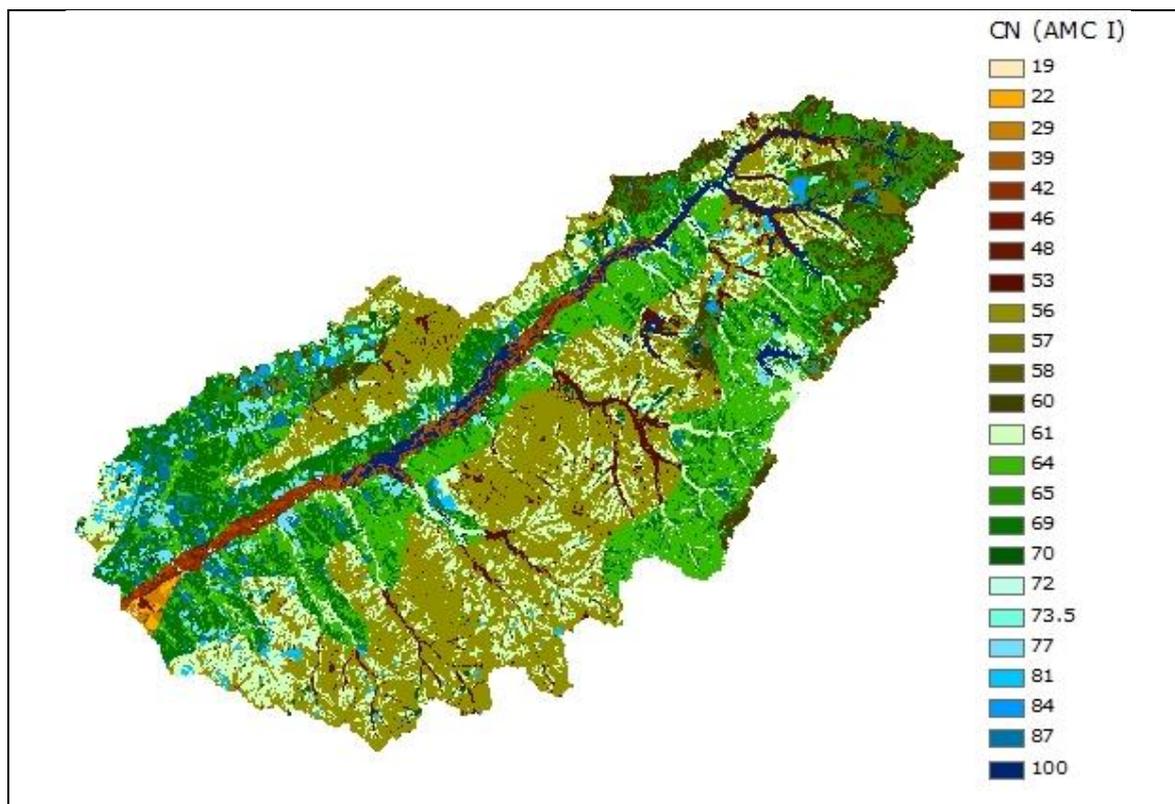


Figura 4.15: Mapa de CN en la cuenca del Arroyo Feliciano para febrero 2010 (CN₂₀₁₀)

4.4.3 MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA

4.4.3.1 INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en la modelación hidrológica es la consideración de la distribución espacial de las precipitaciones. Esta información podría ser obtenida de radares meteorológicos pero en nuestro país generalmente no se dispone de tales sino que usualmente se cuenta con datos puntuales provenientes de mediciones pluviométricas. En este último caso, para generar una superficie continua de precipitación, es necesario predecir los valores de la variable en los puntos no medidos recurriendo a técnicas de interpolación, entre las cuales se encuentra la geoestadística.

A diferencia de la estadística clásica la geoestadística tiene en cuenta la correlación espacial entre los valores observados para valorar la variable en un punto no medido del espacio.

Para datos de precipitaciones la hipótesis de la estadística clásica, de independencia de las observaciones, resulta no apropiada en el marco espacial. Intuitivamente, es de esperar que observaciones próximas tengan valores más cercanos que aquellas que están más alejadas entre sí y de allí que se juzga conveniente la aplicación de la geoestadística.

Capítulo 4: Metodología

Saz Sánchez y Serrano (2002) aplicaron diferentes técnicas estadísticas para obtener cartografía de precipitación a partir de datos puntuales en el valle del Ebro concluyendo que el modelo geoestadístico es el que proporciona mejores resultados.

4.4.3.2 METODOLOGÍA APLICADA

De acuerdo a lo indicado por Vanderlinden (2003), citado por Gómez et al. (2006), la realización de un análisis geoestadístico involucra las siguientes tareas en el orden que se indican:

- ✓ Análisis exploratorio de los datos
- ✓ Análisis estructural de los datos
- ✓ Interpolación Espacial
- ✓ Validación del modelo geoestadístico

Los procedimientos aplicados en la resolución de cada uno de estos pasos se detallan en los puntos subsiguientes.

La herramienta utilizada fue la extensión Geostatistical Analyst para ArcGIS que permite modelar superficies a partir de métodos determinísticos y geoestadísticos y que en particular, para el presente estudio, tiene la ventaja de trabajar en la misma plataforma SIG que el modelo de cuenca, posibilitando una integración estrecha y directa de las distintas fases de generación del modelo hidrológico.

Si bien Geostatistical Analyst contiene una serie de herramientas que permiten resolver todas las etapas mencionadas, en este estudio se optó realizar el análisis exploratorio de los datos utilizando un software más específico: IBM SPSS Statistics 19.0 que es un paquete de programas estadísticos que permite un análisis detallado de los datos.

4.4.3.2.1 Análisis Exploratorio de los Datos

Previo a la aplicación de métodos geoestadísticos se debe realizar un análisis exploratorio de los datos con los siguientes objetivos:

A. Detectar valores atípicos que se destaquen en relación a los datos vecinos (outliers).

B. Verificar que la distribución estadística de los datos se aproxime a la distribución normal que es una hipótesis de la geoestadística.

C. Verificar la estacionariedad de la serie, esto es que los datos no presenten una tendencia y es otra hipótesis de la que parte el análisis geoestadístico.

Capítulo 4: Metodología

En esta sección se describen los procedimientos aplicados para el desarrollo de los puntos enunciados.

A. Detección de Valores Atípicos (outliers)

Los “datos atípicos” son puntos que se alejan significativamente de la tendencia que se observa en el resto de la información disponible y pueden deberse a errores en la recopilación de los datos. La inclusión de los mismos puede afectar los resultados del análisis geoestadístico siendo importante, entonces, su análisis a fin de justificar la necesidad de eliminarlos o de mantenerlos.

Para la detección de datos dudosos se aplicó la técnica del diagrama de caja que es una representación gráfica de la distribución de los datos que permite analizar características de la serie tales como, el centro, la dispersión, la simetría o asimetría y la identificación de observaciones atípicas.

La caja está delimitada superiormente por el tercer cuartil Q3 e inferiormente por el primer cuartil Q1 y dentro de la misma se traza el segundo cuartil Q2 (mediana). De las aristas del rectángulo se extiende una línea, o bigote, cuyo extremo indica el valor mínimo y máximo de la serie que no alcanza a ser atípico, es decir que se encuentran entre cero y 1.5 veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo. Las observaciones que están entre 1.5 y 3 veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo reciben el nombre de valores atípicos. Las observaciones que están más allá de tres veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo se conocen como valores atípicos extremos. Para la construcción de los diagramas de caja se utilizó el software estadístico IBM SPSS Statistics.

Complementariamente se realizó un análisis de datos dudosos aplicando la metodología propuesta por el Water Resources Council (WRC) detallada en Chow et al. (1994), que permite determinar valores dudosos ya sea por altos o por bajos aplicando las ecuaciones (4.22) y (4.23):

$$y_H = \bar{y} + K_N \cdot S_y \quad (4.22)$$

$$y_L = \bar{y} - K_N \cdot S_y \quad (4.23)$$

Donde:

y_H : umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas

y_L : umbral de dato dudoso bajo en unidades logarítmicas

y : log (x)

Capítulo 4: Metodología

x : variable analizada

\bar{y} : media de los valores log (x)

K_N : valor tabulado en función del tamaño de muestra

S_y : desviación estandar de los valores log (x)

Si un valor de la serie en unidades logarítmicas sobrepasa el valor y_H se considera como dato dudoso alto y análogamente si resulta inferior a y_L se califica como dato dudoso bajo.

Los valores calificados como atípicos por algunos de estos procedimientos se evaluaron en relación a los valores de sus vecinos en el espacio a fin de decidir su eliminación o permanencia.

B. Verificación de la Normalidad de la Serie

En la interpolación espacial se aplica el método de Kriging que en general es un estimador óptimo cuando la variable en estudio proviene de una población con distribución Normal y por consiguiente se requiere previamente confirmar la Normalidad de la serie. En caso de que esto no se verifique existe la posibilidad de aplicarle a la variable una transformación que la lleve a una Normal y a partir de la nueva variable transformada aplicar las ecuaciones del Kriging.

En el presente estudio se realizó el análisis de ajuste de las series a la distribución Normal aplicando técnicas descriptivas y pruebas no paramétricas. Entre las primeras se utilizó el histograma y el gráfico Cuartil-Cuartil (Q-Q) Normal y como prueba no paramétrica se optó por el test de Kolmogorov Smirnov (K-S).

El histograma de la serie representa las características de la distribución y mediante superposición de la curva de distribución Normal permite evaluar el ajuste.

El gráfico Q-Q Normal consiste en la comparación de los cuantiles muestrales con los cuantiles de una distribución Normal. Si la variable seleccionada coincide con la distribución de prueba, los puntos se concentran en torno a una línea recta.

Ambos gráficos descriptos permiten una primera apreciación del ajuste pero no son concluyentes, por lo cual, para completar el análisis, se aplicó la prueba K-S.

El test K-S determina si es razonable pensar que las mediciones muestrales provienen de una población que tenga la distribución teórica de interés. En la prueba se compara la distribución de frecuencia acumulativa teórica con la distribución de frecuencia acumulativa observada. La toma de decisión en el contraste se lleva a cabo mediante comparación de un nivel crítico, denominado *significación asintótica bilateral* (p-valor), con el nivel de

Capítulo 4: Metodología

significancia (α) establecido para la prueba. Si p-valor es mayor a α se acepta la hipótesis de ajuste. Para el caso en estudio se estableció $\alpha=0,05$.

La construcción de los gráficos y la ejecución del test K-S se realizó con el software IBM SPSS Statistics.

C. Verificación de la Estacionariedad de la Serie

Un supuesto importante en el análisis geoestadístico es que el fenómeno es estacionario, ésto es, en un sentido estricto, que las variables en el espacio tengan la misma función de distribución de probabilidad.

En la práctica, resulta una condición de difícil cumplimiento pues normalmente la función de distribución variará de una posición a otra y por esto dicha hipótesis suele reducirse a la exigencia de estacionariedad de segundo orden, que impone la igualdad de medias y varianzas en las diferentes zonas del área de estudio pero permite distintas funciones de distribución.

La falta estacionariedad puede estar provocada por una tendencia espacial lo cual puede ser analizado a través de la construcción de dispersogramas que representan los valores de la variable de interés en función de las coordenadas de medición permitiendo identificar la presencia o ausencia de tendencia direccional en los datos de entrada.

Si se verifica la existencia de una tendencia en los datos, ésta es la componente no aleatoria de la superficie pudiendo ser representada por una fórmula matemática, para realizar la interpolación la tendencia se retira de los datos y el análisis geoestadístico se realiza sobre los residuos que conformarán una serie estacionaria en media, luego la tendencia es añadida antes de generar la superficie final de predicción.

La extensión Geostatistical provee las herramientas para la ejecución de los gráficos de dispersión y para la eliminación de la tendencia en caso que exista.

4.4.3.2.2 Análisis Estructural de los Datos

Esta es la etapa fundamental del análisis geoestadístico e implica el examen de la estructura de correlación espacial de los valores observados mediante la construcción del semivariograma experimental para seleccionar el modelo teórico que mejor refleje el comportamiento espacial de la variable analizada.

El semivariograma es un estadístico que expresa la variabilidad media de la variable con la distancia. La dependencia espacial disminuye a medida que se incrementa la distancia (h) y finaliza a una cierta distancia denominada rango, más allá de la cual la

Capítulo 4: Metodología

tasa media de cambio es independiente de la separación entre las observaciones. La expresión del semivariograma experimental se enuncia en (4.24).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left\langle [Z(x+h) - Z(x)]^2 \right\rangle \quad (4.24)$$

Donde:

$\gamma(h)$: semivariograma (o variograma)

h : vector de separación entre dos puntos

x : posición de la observación

Z : valor de la variables

Para obtener el semivariograma a partir de los datos observados se emplea la ecuación anterior en la forma discretizada que se indica en (4.25):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (4.25)$$

Donde $N(h)$ es el número de pares de puntos separados una distancia h .

La selección del modelo teórico que mejor ajusta se realizó en primera instancia mediante apreciación visual en el gráfico donde se superpone la curva teórica y los puntos del semivariograma experimental. Este gráfico se construyó en ArcGIS mediante la herramienta Geostatistical. Seguidamente se realizó la *interpolación espacial* a partir del modelo teórico seleccionado y se evaluó la precisión de los resultados mediante la *técnica de validación cruzada*, ambas tareas se detallan en los puntos siguientes. Esto se realizó para varios modelos teóricos adoptando finalmente aquel con el que se obtuvieron los resultados más precisos.

4.4.3.2.3 Interpolación Espacial

La interpolación espacial se realizó mediante el método geoestadístico denominado Kriging el que utiliza el modelo teórico seleccionado en el análisis estructural previo.

El método Kriging recibe dicho nombre en reconocimiento al geólogo sudafricano Daniel G. Krige cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década del cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial y encierran un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción que constituye la condición de mínima varianza.

Capítulo 4: Metodología

Kriging aplica un conjunto de técnicas de regresión lineal para minimizar la varianza de estimación para el modelo semivariográfico definido previamente.

La ventaja de Kriging frente a otras técnicas de interpolación espacial es que no sólo tiene en cuenta las características geométricas de las localizaciones observadas sino también la estructura de la correlación espacial que se deduce de la información obtenida del semivariograma y por lo tanto es de esperarse interpolaciones más fiables. Además permite medir la precisión de las estimaciones ya que asocia a cada interpolación un grado de incertidumbre en forma de varianza o desviación estándar y que puede también ser representado en el espacio.

4.4.3.2.4 Validación del Modelo Geoestadístico

Para evaluar la precisión de una estimación realizada a partir de un modelo semivariográfico teórico, se aplicó la técnica de validación cruzada que consiste en eliminar sucesivamente una localización muestral por vez y estimar el valor de la variable en el sitio eliminado a partir de las observaciones correspondientes a las n-1 localizaciones restantes. De esta manera para cada puesto con dato se obtiene un valor estimado y la desviación o error estándar de Kriging y con dicha información se calculan el error de estimación y el error estandarizado aplicando las ecuaciones (4.26) y (4.27) respectivamente.

$$EEi = Z^*(xi) - Z(xi) \quad (4.26)$$

$$SEi = \frac{Z^*(xi) - Z(xi)}{\sigma^*(xi)} \quad (4.27)$$

Donde:

EEi: error de estimación en el puesto i

SEi: error estandarizado en el puesto i

Z(xi): valor observado de la variable x en el puesto i

Z(xi)*: valor estimado de la variable x en el puesto i

$\sigma^*(xi)$: desviación o error estándar de Kriging

El análisis de los errores estandarizados, en lugar de los absolutos, permite evitar restricciones de naturaleza geométrica. En los puntos aislados el error absoluto será más elevado que en aquellos rodeados por vecinos, esto se corrige al considerar el error estandarizado, pues el error estándar cuantifica la precisión que se espera de la estimación

Capítulo 4: Metodología

(Emery, 2007). Por construcción el error estandarizado tiene varianza unitaria independientemente de la configuración geométrica.

Para evaluar el ajuste del modelo se calcularon el Error Medio (ME), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMS), el Error Estandarizado Medio (MSE), la Raíz del Error Estandarizado Cuadrático Medio ($RMSSE$) y el Error Estándar Promedio (ASE) con las expresiones (4.28), (4.29), (4.30), (4.31) y (4.32) respectivamente.

$$ME = \frac{Z^*(xi) - Z(xi)}{n} \quad (4.28)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (Z^*(xi) - Z(xi))^2} \quad (4.29)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_1^n \left[\frac{Z^*(xi) - Z(xi)}{\sigma^*(xi)} \right] \quad (4.30)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n \left[\frac{Z^*(xi) - Z(xi)}{\sigma^*(xi)} \right]^2} \quad (4.31)$$

$$ASE = \frac{1}{n} \sum_1^n \sigma^*(xi) \quad (4.32)$$

Los estadísticos de la validación cruzada permiten evaluar la precisión de una estimación y además constituyen una herramienta para tomar una decisión informada en la selección del modelo variográfico que mejor ajusta. Los criterios utilizados para evaluar la exactitud de una predicción son: el error estandarizado medio próximo a 0 ($MSE \approx 0$), la raíz del error estandarizado cuadrático medio cercana a 1 ($RMSSE \approx 1$), los valores de la raíz del error cuadrático y el error estándar promedio lo más pequeños posible. (ESRI, 2001).

4.4.3.3 APLICACIÓN A LOS DATOS PLUVIOMÉTRICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.4.3.3.1 Selección de Estaciones Pluviométricas

En primer lugar se procedió a la localización georreferenciada de las estaciones pluviométricas de la provincia de Entre Ríos con información disponible en la base de datos de la DH y de la SSRH de las cuales se seleccionaron las incluidas dentro de un rectángulo en el que se inscribe la cuenca del Arroyo Feliciano (Figura 4.16), generándose una capa en el SIG del estudio.

Capítulo 4: Metodología

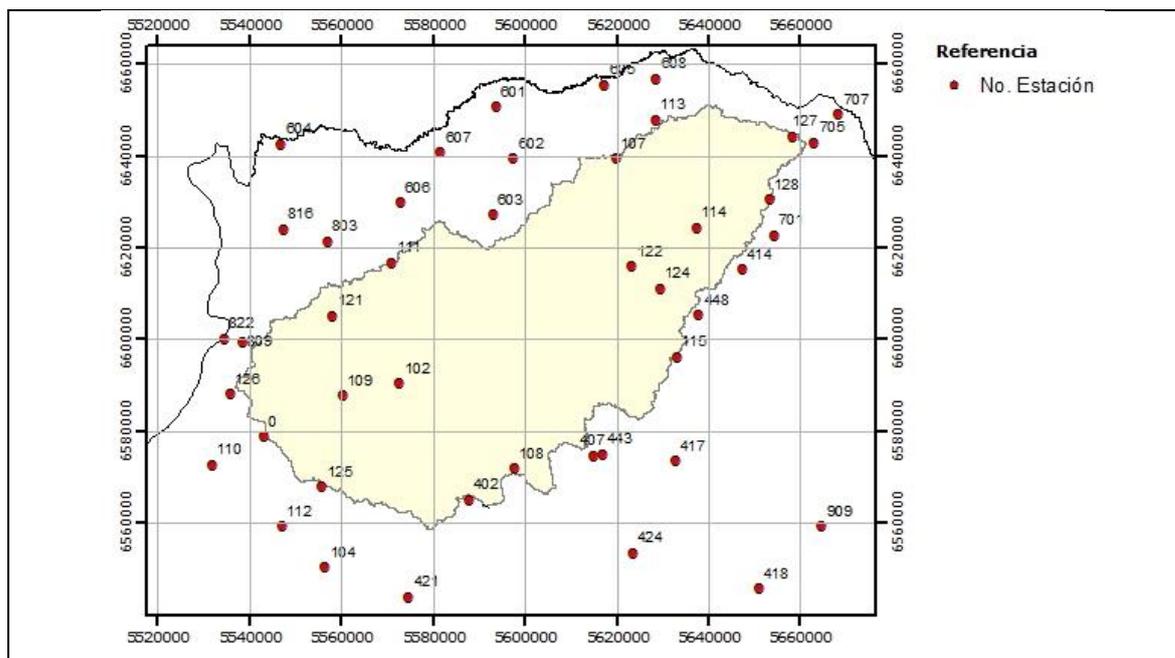


Figura 4.16: Pluviómetros en la cuenca del Arroyo Feliciano y áreas vecinas

4.4.3.3.2 Datos Pluviométricos

Las crecidas del 14 de marzo del 2005 y del 8 de febrero de 2010, seleccionadas para calibrar y validar el modelo hidrológico, fueron originadas por los eventos pluviométricos del 11 al 13 de marzo de 2005 y del 03 al 06 de febrero de 2010. Los datos para cada estación (Tabla 4.9 y Tabla 4.10) fueron extraídos de los registros pluviométricos y se confeccionaron las bases datos para ambos eventos.

Tabla 4.9: Datos pluviométricos evento marzo 2005

PLUVIÓMETROS		COORDENADA (GK F5)		DIA PLUVIOMÉTRICO			TOTAL
No	Estación	X	Y	11MAR	12MAR	13MAR	
		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	Paso Medina	5543010,11	6579065,78	126,0	43,5		169,5
102	Banderas	5572530,58	6590563,18	185	50		235,0
104	Colonia Avigdor	5556309,03	6550570,16	104	54		158,0
107	S.José de Feliciano	5619738,85	6639524,65	36,5	92,5	8,5	137,5
108	El Cimarrón	5597531,22	6572028,35	76	0		76,0
109	El Carmen	5560145,55	6587963,61	220	59		279,0
110	El Quebracho	5531723,68	6572810,35	170	40		210,0
111	Estacas	5570851,17	6616882,29	152	32		184,0
112	La Lila	5546977,25	6559402,77	48	74	48	170,0

Capítulo 4: Metodología

PLUVIÓMETROS		COORDENADA (GK F5)		DIA PLUVIOMÉTRICO			TOTAL
No	Estación	X	Y	11MAR	12MAR	13MAR	
		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
113	La Esmeralda	5628405,43	6647932,28	0	120		120,0
114	La Verbena	5637204,90	6624461,81	75	64		139,0
115	La Calandria	5632876,18	6596385,20	63	62	5	130,0
121	San Gustavo	5557966,72	6605213,12	195	50		245,0
122	Atencio (Est.Sta.María)	5623163,29	6616092,07	S/D	S/D	S/D	S/D
124	Atencio Subcomisaría	5629247,82	6611230,97	82	35		117,0
125	Com. Yeso Oeste	5555731,04	6568039,44	150	56		206,0
126	Estaquitas	5535651,90	6588245,83	0	0	215	215,0
127	Destac. San Pedro	5658279,94	6644275,96	S/D	S/D	S/D	S/D
128	La Hierra	5653111,91	6630631,74	S/D	S/D	S/D	S/D
402	Consc. Bernardi	5587569,29	6565252,60	109	102	14	225,0
407	Federal	5614899,44	6574898,20	97	15	0	112,0
414	Conquistadores	5647131,86	6615391,60	94	13		107,0
417	Nueva Vizcaya	5632623,81	6573730,89	58	72	7	137,0
418	Elías Romero	5650882,69	6545817,72	55	35	20	110,0
421	Sauce de Luna	5574616,13	6544136,18	0	164		164,0
424	Chañar	5623468,02	6553663,69	84	35	23	142,0
443	Federal - Jefatura	5616723,54	6575174,06	79	37		116,0
448	Bella Unión	5637788,14	6605395,43	95	13		108,0
601	Rincón del Chañar	5593502,88	6650807,94	73	59		132,0
602	Las Mulitas	5597354,97	6639570,67	106	79		185,0
603	San Víctor	5592867,93	6627288,81	109	35	25	169,0
604	Paso Telégrafo	5546761,91	6642616,96	0	96	42	138,0
605	Puente de Hierro	5617257,56	6655529,86	76	60		136,0
606	Tacuara Ombú	5572761,28	6629915,42	140	65		205,0
607	Mulas Grandes	5581574,76	6640804,40	165	0		165,0
608	Rincón de Mesa	5628557,36	6656996,74	S/D	S/D	S/D	S/D
701	Est.B.Esperanza	5654195,75	6622769,91	105	27		132,0
705	S. Jaime Corralón	5662932,50	6643012,13	70	28		98,0
707	San Jaime Caminera	5668281,51	6649203,45	0	105		105,0
803	Colonia Oficial N°3	5556897,29	6621473,44	112	18		130,0

Capítulo 4: Metodología

PLUVIÓMETROS		COORDENADA (GK F5)		DIA PLUVIOMÉTRICO			TOTAL
No	Estación	X	Y	11MAR	12MAR	13MAR	
		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
809	La Paz Comisaría 1°	5538359,93	6599455,75	166	18	66	250,0
816	Tacuara Yacaré	5547225,08	6624177,68	140	20		160,0
822	La Paz – Subprefec.	5534439,40	6600405,26	100	35		135,0
909	El Redomón Destac.	5664633,70	6559409,29	S/D	S/D	S/D	S/D

Tabla 4.10: Datos pluviométricos evento febrero 2010

PLUVIOMETROS		COORDENADA (GK F5)		DIA PLUVIOMÉTRICO				TOTAL
No	Estación	X	Y	03FEB	04FEB	05FEB	06FEB	
		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	Paso Medina	5543010,11	6579065,78		121,0			121,0
102	Banderas	5572530,58	6590563,18	10,0	25,0	123,0		158,0
104	Colonia Avigdor	5556309,03	6550570,16	35,0	12,0	165,0		212,0
107	S. José de Feliciano	5619738,85	6639524,65	33,0	30,0	81,0		144,0
108	El Cimarrón	5597531,22	6572028,35	19,0	4,0	185,0		208,0
109	El Carmen	5560145,55	6587963,61	42,0	15,0	140,0		197,0
110	El Quebracho	5531723,68	6572810,35	40,0	20,0	135,0		195,0
111	Estacas	5570851,17	6616882,29	43,0		110,0		153,0
112	La Lila	5546977,25	6559402,77	31,0	16,0	90,0	36,0	173,0
113	La Esmeralda	5628405,43	6647932,28	26,0	31,0	75,0		132,0
114	La Verbena	5637204,90	6624461,81	38,0	13,0	75,0		126,0
115	La Calandria	5632876,18	6596385,20	28,0	5,0	80,0		113,0
121	San Gustavo	5557966,72	6605213,12	39,0	47,0	22,0		108,0
122	Atencio (Est.Sta.María)	5623163,29	6616092,07	32,0	29,0	87,0		148,0
124	Atencio Subcomisaría	5629247,82	6611230,97	55,0	40,0	115,0		210,0
125	Com.Yeso Oeste	5555731,04	6568039,44	40,0	6,0	128,0		174,0
126	Estaquitas	5535651,90	6588245,83	36,0	13,0	60,0		109,0
127	Destac. San Pedro	5658279,94	6644275,96	42,0	30,0			72,0
128	La Hierra	5653111,91	6630631,74	22,0	32,0	76,0		130,0
402	Conscripto Bernardi	5587569,29	6565252,60	38,0	12,0	133,0		183,0
407	Federal	5614899,44	6574898,20	23,0	28,0	120,0	55,0	226,0

Capítulo 4: Metodología

PLUVIOMETROS		COORDENADA (GK F5)		DIA PLUVIOMÉTRICO				TOTAL
No	Estación	X	Y	03FEB	04FEB	05FEB	06FEB	
		[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
414	Los Conquistadores	5647131,86	6615391,60	34,0	70,0	45,0	74,0	223,0
417	Nueva Vizcaya	5632623,81	6573730,89	55,0	25,0	88,0		168,0
418	Elías Romero	5650882,69	6545817,72	50,0	15,0	160,0	50,0	275,0
421	Sauce de Luna	5574616,13	6544136,18	23,0	20,0	151,0		194,0
424	Chañar	5623468,02	6553663,69	35,0	175,0	0,0		210,0
443	Federal - Jefatura	5616723,54	6575174,06	36,0	25,0	185,0		246,0
448	Bella Unión	5637788,14	6605395,43		51,0	15,0		66,0
601	Rincón del Chañar	5593502,88	6650807,94	62,0	20,0	64,0		146,0
602	Las Mulitas	5597354,97	6639570,67	37,0	30,0	45,0		112,0
603	San Víctor	5592867,93	6627288,81	35,0		77,0		112,0
604	Paso Telégrafo	5546761,91	6642616,96	40,0	48,0			88,0
605	Puente de Hierro	5617257,56	6655529,86	36,0	30,0	55,0		121,0
606	Tacuara Ombú	5572761,28	6629915,42	35,0	19,0	70,0		124,0
607	Mulas Grandes	5581574,76	6640804,40	43,0	15,0	40,0		98,0
608	Rincón de Mesa	5628557,36	6656996,74	25,0		75,0		100,0
701	Est. B. Esperanza	5654195,75	6622769,91	33,0	88,0	0,0	4,0	125,0
705	San Jaime Corralón	5662932,50	6643012,13	20,0	30,0	100,0		150,0
707	San Jaime Caminera	5668281,51	6649203,45	13,0	18,0	56,0		87,0
803	Colonia Oficial N°3	5556897,29	6621473,44	23,0	13,0	117,0		153,0
809	La Paz Comisaría 1°	5538359,93	6599455,75	35,0	37,0	40,0		112,0
816	Tacuara Yacaré	5547225,08	6624177,68	45,0	9,0	115,0		169,0
822	La Paz – Subprefec.	5534439,40	6600405,26	35,0	7,0	68,0	30,0	140,0
909	El Redomón Destac.	5664633,70	6559409,29	47,0	53,0	138,0		238,0

4.4.3.3.3 Distribución Temporal de las Precipitaciones

Para el análisis de la distribución temporal de las precipitaciones se contó con la siguiente información que fue cedida por la DH:

- Para la precipitación de marzo 2005 se dispuso de la faja pluviográfica de la Estación La Lila de la cual se obtuvo el patrón que se esquematiza en Figura 4.17.

 Capítulo 4: Metodología

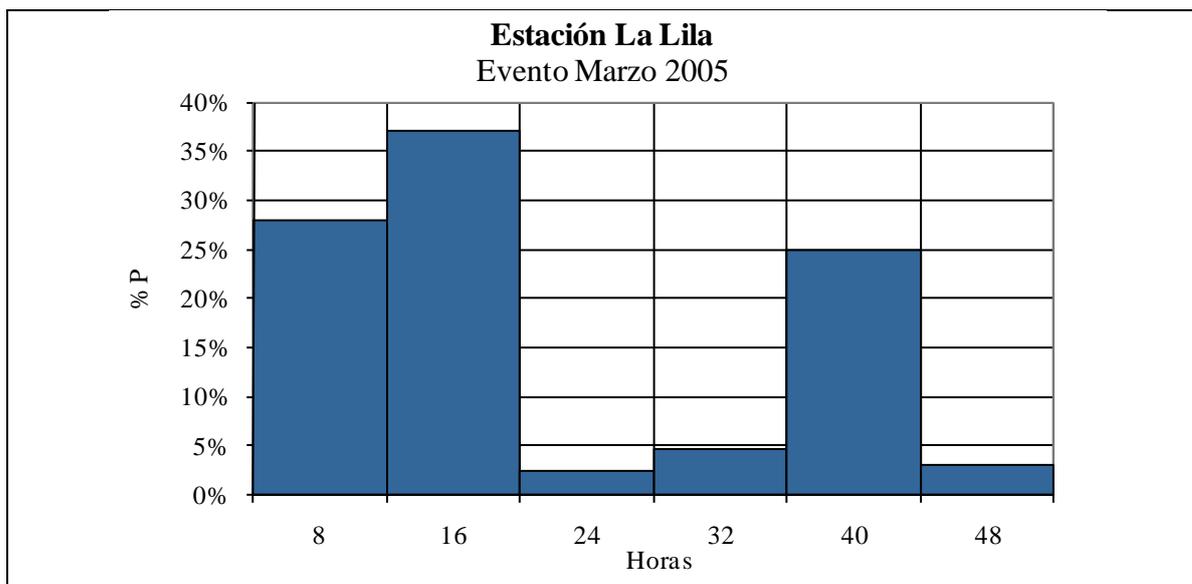


Figura 4.17: Distribución temporal de la tormenta del 11 al 13 de marzo 2005

- Para el evento analizado en febrero 2010 se contó con los datos digitales de la estación automática de San José de Feliciano a partir de la cual se obtuvo la distribución indicada en Figura 4.18.

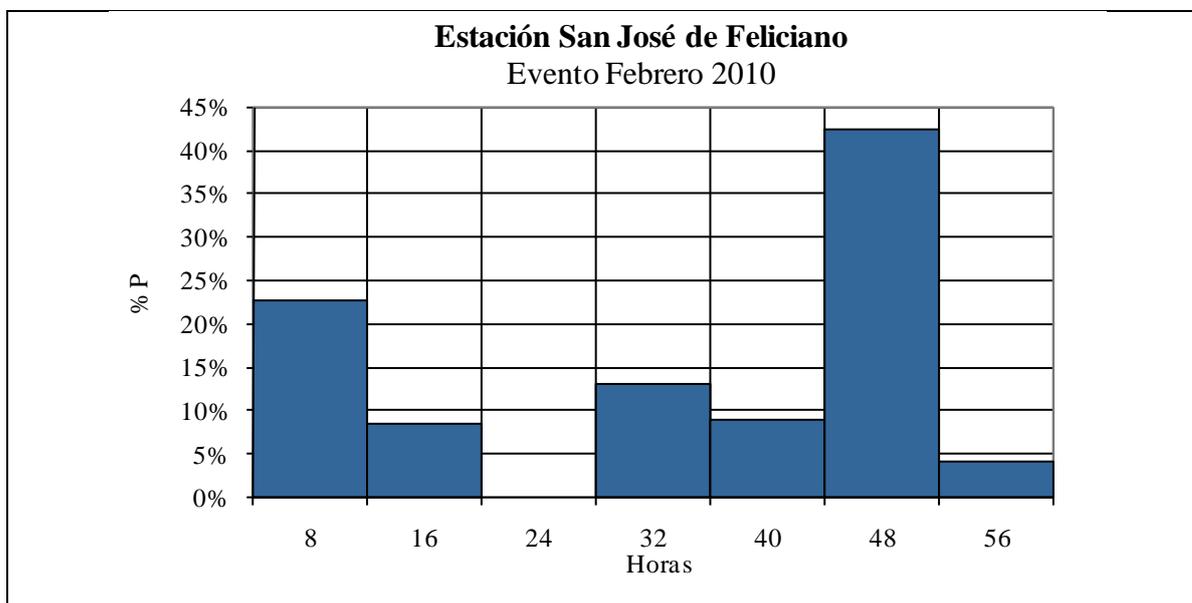


Figura 4.18: Distribución temporal de la tormenta del 03 al 06 de febrero 2010

La precipitación total de cada pluviómetro se discretizó en intervalos de 8 horas considerando el patrón de distribución temporal disponible para la fecha correspondiente. Para ello previamente se realizó el análisis de la calidad de los datos como se describe en el punto “4.4.3.3.4.1 Detección de Valores Atípicos (outliers)” para luego conformar la serie temporal a partir de los datos considerados como confiables.

Capítulo 4: Metodología

4.4.3.3.4 Análisis Exploratorio de los Datos

4.4.3.3.4.1 Detección de Valores Atípicos (outliers)

En ANEXO 5 se presentan los resultados del análisis realizado sobre los datos pluviométricos diarios de los dos eventos estudiados para detectar si existen valores atípicos aplicando los diagramas de caja y la metodología del WRC. En los diagramas de caja se indicaron los valores atípicos con un círculo y los extremos con un asterisco, las etiquetas de dichos símbolos indican el número de la estación. En las tablas del procedimiento del WRC se señalaron los datos que resultan dudosos por exceso o por defecto.

Para decidir si se eliminan las estaciones con datos calificados como dudosos se realizó un análisis en SIG evaluando los valores dudosos con respecto a los observados en los pluviómetros más cercanos. Simultáneamente se analizó la distribución espacial de los datos a fin de optimizarla eliminando aquellas estaciones que se encuentran muy cercanas en comparación con el espaciamiento general, como por ejemplo en Federal donde se tiene dos pluviómetros en menos de 2 Km.

Finalmente y como resultado de los análisis detallados se removieron las siguientes estaciones:

	Evento marzo 2005	Evento febrero 2010
Estaciones removidas	108 – 126 – 407 – 421 - 607 y 822	0 – 127 – 407 – 414 – 424 – 448 – 601 - 701 y 822

4.4.3.3.4.2 Verificación Normalidad de las Series

Las series analizadas fueron las conformadas con los datos de precipitación en intervalos de 8 horas obtenidos al aplicar el patrón de distribución temporal a las estaciones que resultaron confiables en el análisis de datos atípicos.

En ANEXO 5 se presentan los resultados del SPSS para cada serie. Se observó que prácticamente todas series ajustan gráficamente (histogramas y QQ-Plot) a la distribución Normal y en las pruebas K-S el valor de *significación asintótica bilateral* resultó superior al nivel de significancia $\alpha=0,05$ y por lo tanto no fue necesario la aplicación de transformaciones. Existe una excepción que se produce en ambos eventos (2005 y 2010) y hacia el final de los mismos, es decir en las series de los últimos intervalos, en donde las precipitaciones se registran en forma aislada en algunos pocos pluviómetros resultando series de pocos datos sin

Capítulo 4: Metodología

ajuste a una distribución Normal y por consiguiente no podrá aplicarse para dichos intervalos el método de Kriging.

4.4.3.3.4.3 Análisis de la Estacionariedad de la Serie

La estacionariedad de la serie se analizó en ArcGIS a partir de los gráficos de dispersión. En los casos en que se detectó una tendencia direccional en los datos, se evaluaron los resultados de la interpolación con y sin eliminación de la tendencia para adoptar finalmente los de mayor precisión.

4.4.3.3.5 Análisis Estructural de los Datos, Interpolación Espacial y Validación

Para cada serie de precipitaciones en intervalos de 8 horas se construyó el semivariograma a partir del cual se realizó el análisis estructural. Se evaluó la correlación espacial entre los datos y se ensayaron diferentes modelos teóricos para determinar el que mejor ajusta al semivariograma experimental. Para cada modelo teórico se realizaron las interpolaciones espaciales mediante el método de Kriging y se aplicó la técnica de validación cruzada para seleccionar el modelo de mejor ajuste. Los modelos finalmente adoptados fueron el Gaussiano y el Stable.

Para la situación particular observada en las series de precipitaciones de los dos intervalos finales del evento de marzo 2005 y del último de febrero 2010, donde no se evidenció un patrón de distribución espacial ni se verificó la hipótesis de normalidad de la serie, se utilizó el método determinístico IDW.

En Tabla 4.11 y en Tabla 4.12 se indican, para los eventos de marzo 2005 y febrero 2010 respectivamente, los modelos de interpolación usado para cada serie temporal de precipitaciones y los errores de predicción correspondientes.

Capítulo 4: Metodología

Tabla 4.11: Errores de predicción mapas precipitación marzo 2005

Intervalo de Precipitación		Método interpol.	Modelo Variográfico	Errores de Predicción				
				Errores absolutos		Errores estandarizados		Error Estándar
Inicio	Fin			ME	RMS	MSE	RMSS E	ASE
11/03/05 17:00	- 12/03/05 01:00	Kriging	Gaussiano	0,997	21,990	0,031	1,012	21,522
12/03/05 01:00	- 12/03/05 09:00	Kriging	Gaussiano	1,487	23,273	0,047	1,039	21,546
12/03/05 09:00	- 12/03/05 17:00	Kriging	Gaussiano	-0,567	24,202	-0,015	1,044	22,821
12/03/05 17:00	- 13/03/05 01:00	Kriging	Gaussiano	-0,036	1,520	-0,014	1,046	1,430
13/03/05 01:00	- 13/03/05 09:00	Kriging	Gaussiano	-0,073	3,043	-0,014	1,058	2,815
13/03/05 09:00	- 13/03/05 17:00	IDW		-1,053	15,554			
13/03/05 17:00	- 14/03/05 01:00	IDW		-0,124	1,815			

Tabla 4.12: Errores de predicción mapas precipitación febrero 2010

Intervalo de Precipitación		Método interpol.	Modelo Variográfico	Errores de Predicción				
				Errores absolutos		Errores estandarizados		Error Estándar
Inicio	Fin			ME	RMS	MSE	RMSS E	ASE
04/02/10 01:00	- 04/02/10 09:00	Kriging	Gaussiano	0,018	9,732	0,000	0,996	9,850
04/02/10 09:00	- 04/02/10 17:00	Kriging	Gaussiano	-0,034	6,237	-0,006	1,129	5,423
04/02/10 17:00	- 05/02/10 01:00	Sin precipitación						
05/02/10 01:00	- 05/02/10 09:00	Kriging	Gaussiano	0,137	10,098	0,010	1,114	8,857
05/02/10 09:00	- 05/02/10 17:00	Kriging	Stable	0,101	5,828	0,014	1,026	5,683
05/02/10 17:00	- 06/02/10 01:00	Kriging	Stable	0,319	27,941	0,009	1,037	26,903
06/02/10 01:00	- 06/02/10 09:00	Kriging	Stable	0,032	2,783	0,009	1,037	2,680
06/02/10 09:00	- 06/02/10 17:00	IDW		-0,211	11,999			

En Figura 4.19 y en Figura 4.20 se presentan los mapas de precipitación para cada intervalo de tiempo de los eventos de marzo 2005 y febrero 2010 respectivamente. En ANEXO 6 se adjuntan los resultados del modelo de interpolación con los estadísticos de los errores de predicción de cada mapa.

Capítulo 4: Metodología

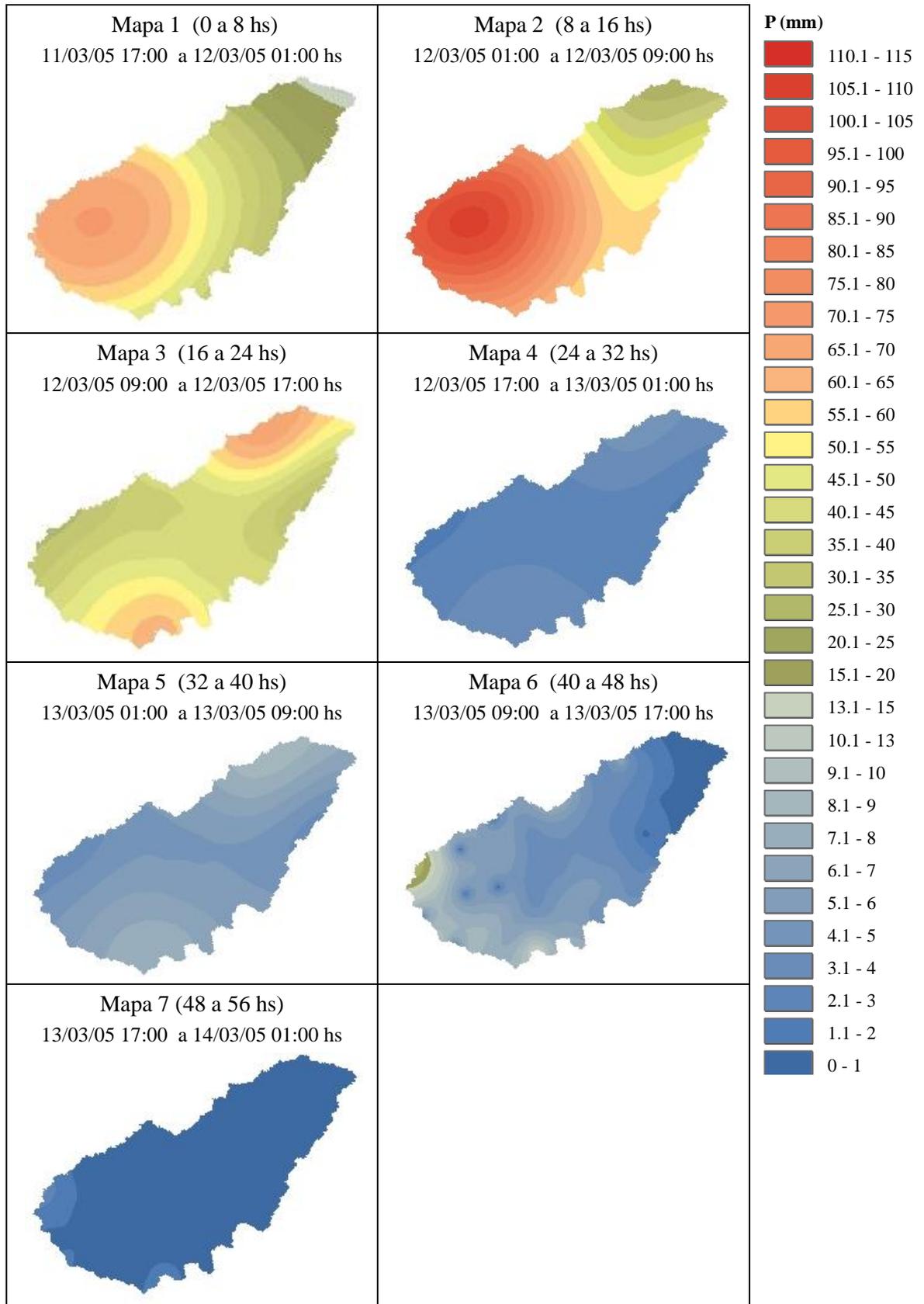


Figura 4.19: Evento marzo 2005. Mapas de precipitaciones en intervalos de 8 horas

Capítulo 4: Metodología

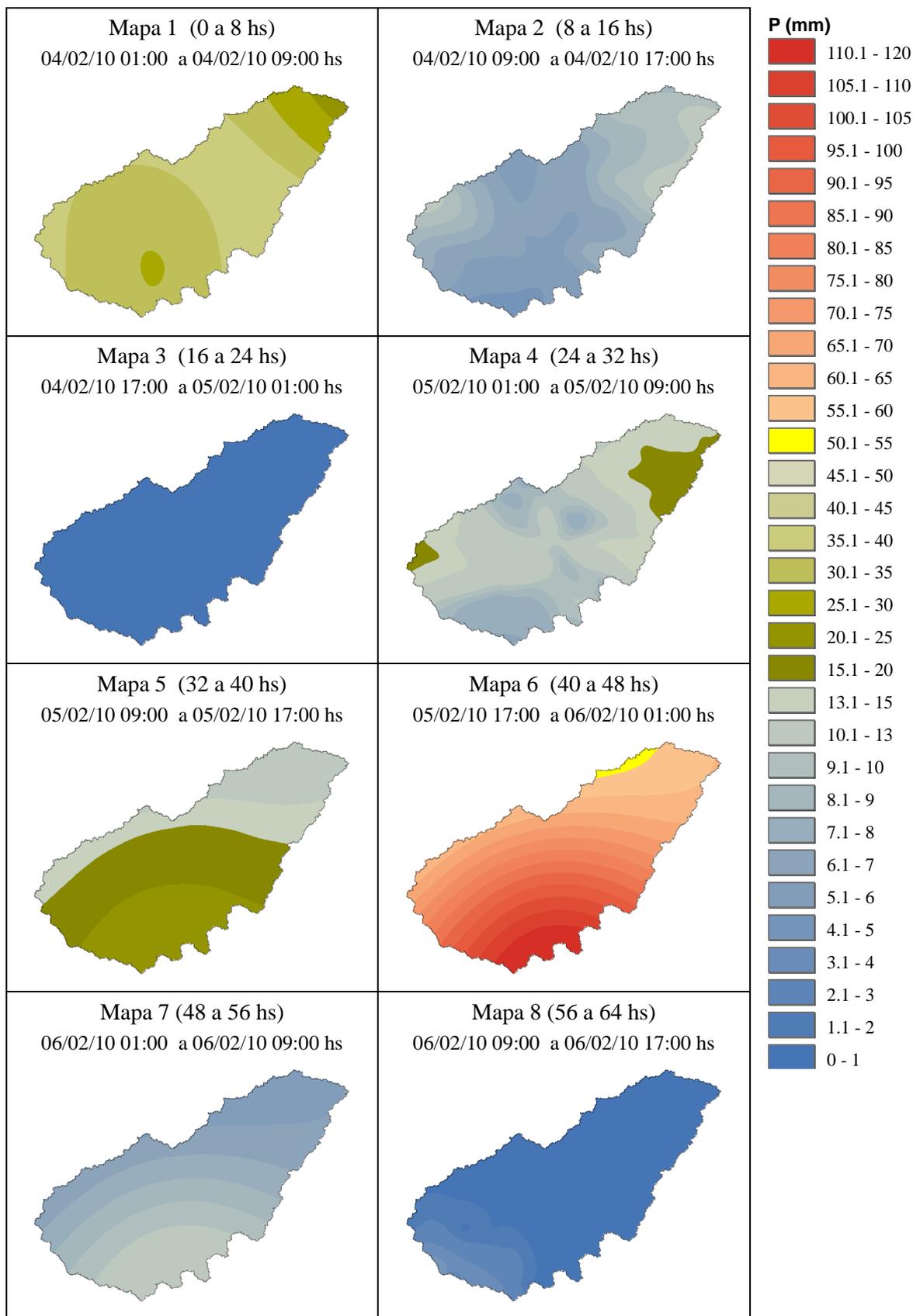


Figura 4.20: Evento febrero 2010. Mapas de precipitaciones en intervalos de 8 horas

Capítulo 4: Metodología

4.5 MODELO DISTRIBUIDO DE CUENCA

4.5.1 EXTENSIÓN HEC-GEOHMS

La extensión HEC-GeoHMS (Fleming and Doan, 2010) para ArcGIS ha sido desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos con el propósito de crear los archivos para los modelos hidrológicos incluidos en HEC-HMS a partir del Modelo Digital de Elevación del terreno (MDE). Básicamente la aplicación consta de las etapas que se describen a continuación que permiten la delimitación de la cuenca y la asignación de los parámetros físicos e hidrológicos.

4.5.1.1 PRE PROCESAMIENTO DEL TERRENO

En esta etapa se trazan las trayectorias de drenaje y se delimitan las cuencas mediante un conjunto de operaciones geospaciales sobre la información del MDE.

El trazado de las líneas de escurrimiento se fundamenta en el principio básico que el agua en su recorrido se mueve al potencial más bajo posible. El agua en una celda tiene ocho direcciones posibles para moverse a la celda vecina (Figura 4.21), la dirección seleccionada será aquella para la cual la pendiente es máxima. El algoritmo que describe la dirección de flujo fue desarrollado por O'Callaghan y Mark en 1984 y se lo conoce como algoritmo determinístico 8 ó D8 (Santos, 2006).

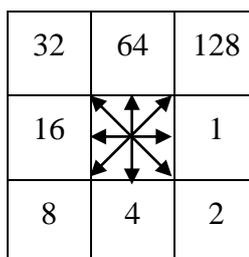


Figura 4.21: Esquema de codificación de las celdas según la dirección de flujo

El número de celdas que contribuyen a la celda analizada se determina mediante el flujo acumulado establecido a partir de la matriz de la dirección del flujo definida con el algoritmo D8. La red de drenaje en la superficie del MDE se extrae de los datos de flujo acumulado indicando previamente el área de drenaje a partir del cual comienza a delinearse un cauce, este es conocido como valor umbral. A partir de la información procesada se delimitan automáticamente las subcuencas con cierre en las confluencias de cauces o en puntos indicados.

Capítulo 4: Metodología

4.5.1.2 CREACIÓN DEL MODELO DE CUENCA

En este paso se crea el proyecto de la cuenca para la cual se realizará la modelación en HEC-HMS. Sobre la red de drenaje definida sobre el MDE y mediante aplicación en HEC-GeoHMS se indica el punto de cierre de la cuenca, realizado esto se exporta automáticamente toda la información obtenida en el pre procesamiento del terreno para el área aguas arriba del punto señalado.

Con base a la información extraída se determinan, mediante operaciones en SIG, las características físicas de los cauces y subcuencas (longitud, pendiente, mayor trayectoria del escurrimiento, ubicación y datos del centroide).

4.5.1.3 DISCRETIZACIÓN DE LA CUENCA EN CELDAS Y ASIGNACIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

En esta etapa HEC-GeoHMS genera el archivo con los parámetros de las celdas en que se divide la cuenca mediante intersección de una grilla vectorial de celdas cuadradas con la representación vectorial de los límites de subcuencas definidos en el punto anterior. El tamaño de celda es adoptado por el usuario dentro de los disponibles en el programa (de 10 m a 10 Km). Cada celda queda identificada por un par de valores (CELL_X y CELL_Y) que refieren a la posición de su esquina inferior izquierda con respecto al origen de coordenadas. Estos índices se calculan como la coordenada correspondiente redondeada al entero menor o igual dividido el tamaño de celda ($CELL_X = X_{entero}/\text{tamaño celda}$, $CELL_Y = Y_{entero}/\text{tamaño celda}$). Además a cada celda se le asigna el valor de su área y de la longitud de viaje hasta el punto de salida, este último es utilizado luego en HEC-HMS para calcular el tiempo de traslado requerido por el método ModClark.

Por otro lado y en base a las características físicas determinadas se asignan a los tramos de cauce con tránsito de hidrograma los datos requeridos por el método de Muskingum Cunge.

4.5.1.4 OBTENCIÓN DEL ARCHIVO PARA HEC-HMS

El programa captura los elementos hidrológicos, sus conectividades y los parámetros físicos y de proceso y genera el archivo de la cuenca en formato para HEC-HMS.

Capítulo 4: Metodología

4.5.2 MODELO DE CUENCA DEL ARROYO FELICIANO

4.5.2.1 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DE BASE

El MDE para la cuenca del Arroyo Feliciano se generó a partir del modelo de elevación generado en el año 2000 por la Misión Topográfica de Radar Shuttle (SRTM) para la zona del globo terráqueo entre 56 °S a 60 °N. Esta información se encuentra disponible en diversos sitios de internet, entre ellos el del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://srtm.usgs.gov>). Los datos son del tipo raster, el tamaño de celda es de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m x 90 m), se encuentran en sistema de referencia geográfico datum WGS84.

Del modelo del SRTM se extrajo una extensión tal que no solo contenga la superficie de la cuenca del Arroyo Feliciano sino que la supere (Figura 4.22) de modo de permitir la determinación de las divisorias de aguas. La información obtenida se transformó al sistema de coordenadas Posgar 94-Zona 5.

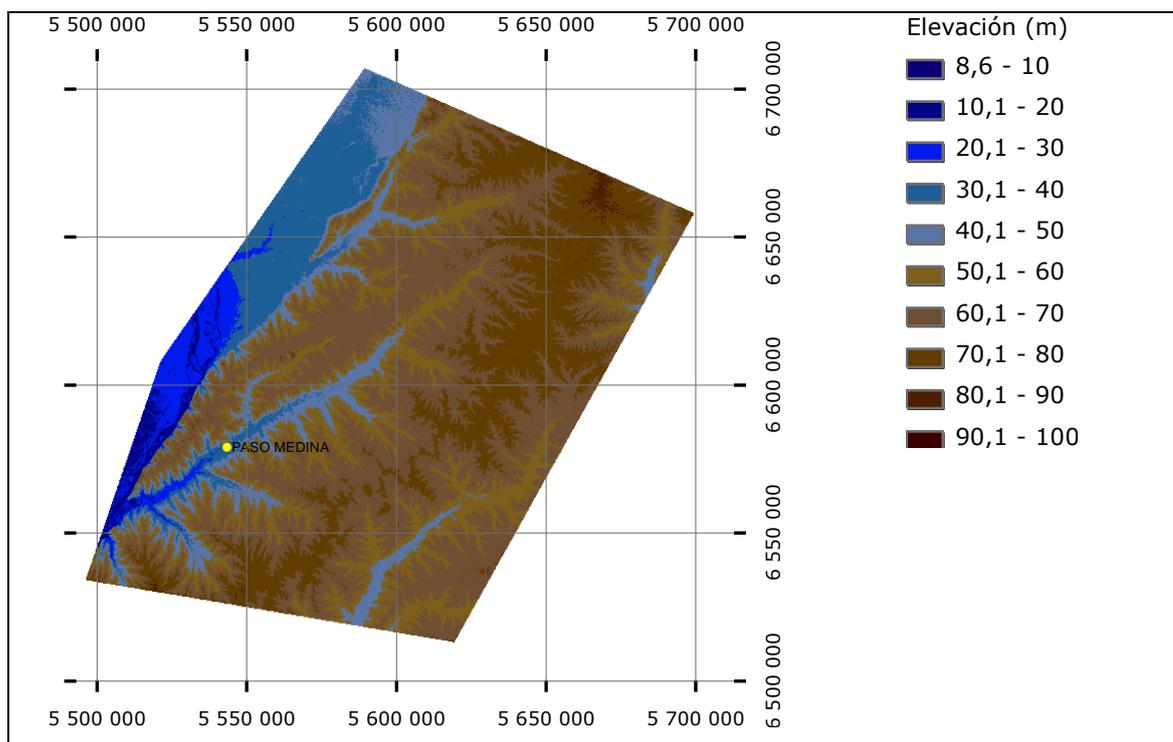


Figura 4.22: Modelo digital de elevación del terreno

4.5.2.2 REPROCESAMIENTO DEL TERRENO

En la aplicación de HEC-GeoHMS para el trazado de la red de drenaje se debe tener en cuenta la posibilidad de que el flujo se pudiese acumular en alguna depresión en el interior del MDE y que, en consecuencia, la red resultante no se desarrollase hasta el límite

Capítulo 4: Metodología

del modelo. Estas depresiones en el MDE reciben el nombre de Sinks (sumideros) y pueden deberse a dos causas: que sea una depresión natural hacia donde desembocan todas las líneas de flujo o que sea artificial debida a errores del MDE. En este último caso se deben eliminar antes de intentar derivar cualquier información de superficie y para ello se emplea el método de llenado de depresiones denominado Fill Sinks en HEC-GeoHMS que consiste en corregir las depresiones incrementando los valores de las celdas incluidas en aquellas hasta el valor de la celda con la elevación más baja en el límite de la depresión, como resultado se obtiene un MDE corregido que garantiza la continuidad de la red hidrográfica.

En esta tesis, previo a la aplicación del Fill Sinks, se realizó un análisis del MDE para asegurar que las depresiones eran artificiales, identificando los sumideros dentro del MDE con la herramienta Sink, incluida en ArcGIS, que produjo un raster con todos los sumideros que fueron reconocidos como áreas de drenaje interno en la superficie de elevación de entrada. A partir de esto se verificó que en todos los casos los Sinks resultaron pixeles aislados y superponiéndolos con imagen satelital se corroboró que no se correspondían con depresiones naturales y en consecuencia se procedió a corregir el MDE rellenando las depresiones artificiales.

A partir del MDE corregido se continuó con los sucesivos pasos para la creación de los archivos de dirección de flujo, flujo acumulado, red hidrográfica en el área de trabajo y delimitación de las subcuencas. Para la adopción del valor umbral, requerido para la definición de la red de drenaje, se evaluaron diferentes valores optándose por 500 Km² para el cual se obtuvo una división de la cuenca del Arroyo Feliciano en 7 subcuencas. Esta división se consideró como suficiente a los fines del estudio ya que al aplicar un modelo distribuido la subdivisión en subcuencas tiene por objetivo la consideración del tránsito en cauces. El resultado obtenido se presenta en Figura 4.23.

Capítulo 4: Metodología

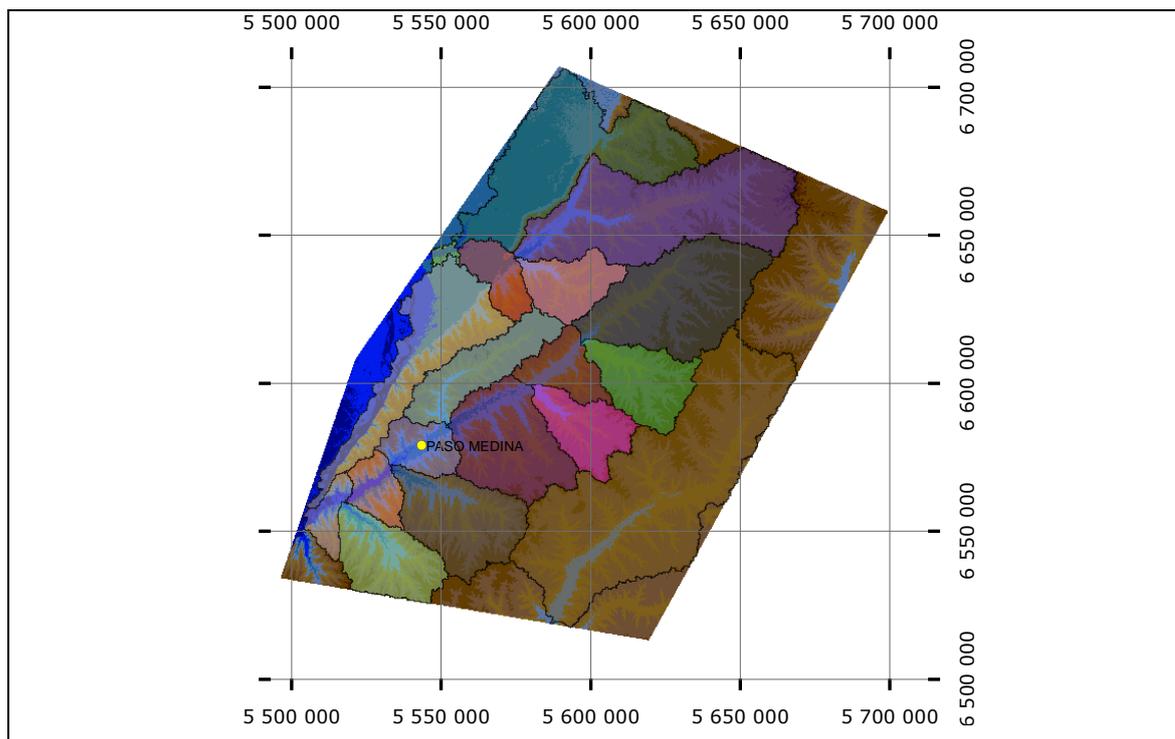


Figura 4.23: Pre procesamiento del terreno. Delimitación de cuencas en el área del MDE

4.5.2.3 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA Y DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Para extraer la información de la cuenca del Arroyo Feliciano se indicó la sección de salida en la Estación Paso Medina donde se tienen datos observados de caudales. Los datos se exportan a un nuevo data frame¹.

Los límites de la cuenca y subcuencas obtenidos con HEC-GeoHMS fueron validados mediante comparación con el modelo obtenido por método tradicional, trazado manual sobre carta topográfica del Instituto Geográfico Nacional (IGN), en estudio de Zucarelli et al. (2005), dando un resultado satisfactorio con una excelente coincidencia.

A continuación se calcularon las características físicas de las subcuencas y de los cauces (áreas, longitudes, pendientes, etc.), las que se almacenaron automáticamente en las tablas de atributos correspondientes.

¹ Data frame: marco de datos dentro del cual se organizan las diferentes capas de un proyecto en ArcGIS.

Capítulo 4: Metodología

4.5.2.4 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DE LA CUENCA

La cuenca se interceptó con una grilla de un tamaño de celda de 2Kmx2Km, el resultado es un shape polígono donde cada celda tiene asociada la información requerida por el método de transformación ModClark. El modelo de cuenca distribuido que se obtuvo se presenta en Figura 4.24.

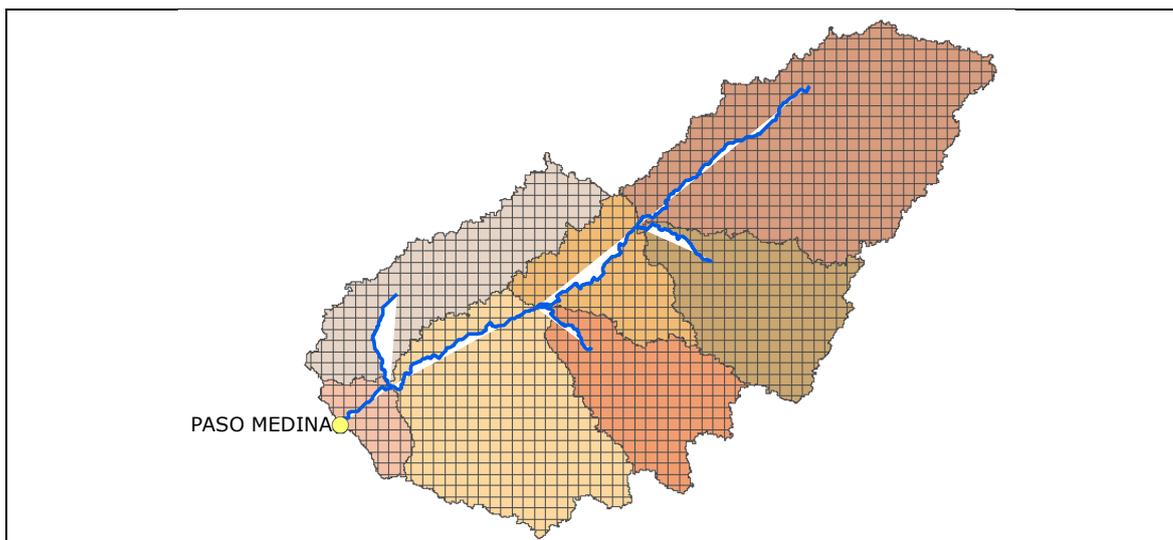


Figura 4.24: Modelo distribuido de la cuenca. Tamaño celda 2Kmx2Km

A partir de la información generada se preparó el esquema de cuenca para HEC-HMS, en este proceso se capturaron los elementos hidrológicos, sus conectividades y la información geográfica vinculada creándose un archivo específico para el modelo hidrológico. El esquema topológico se presenta en Figura 4.25.

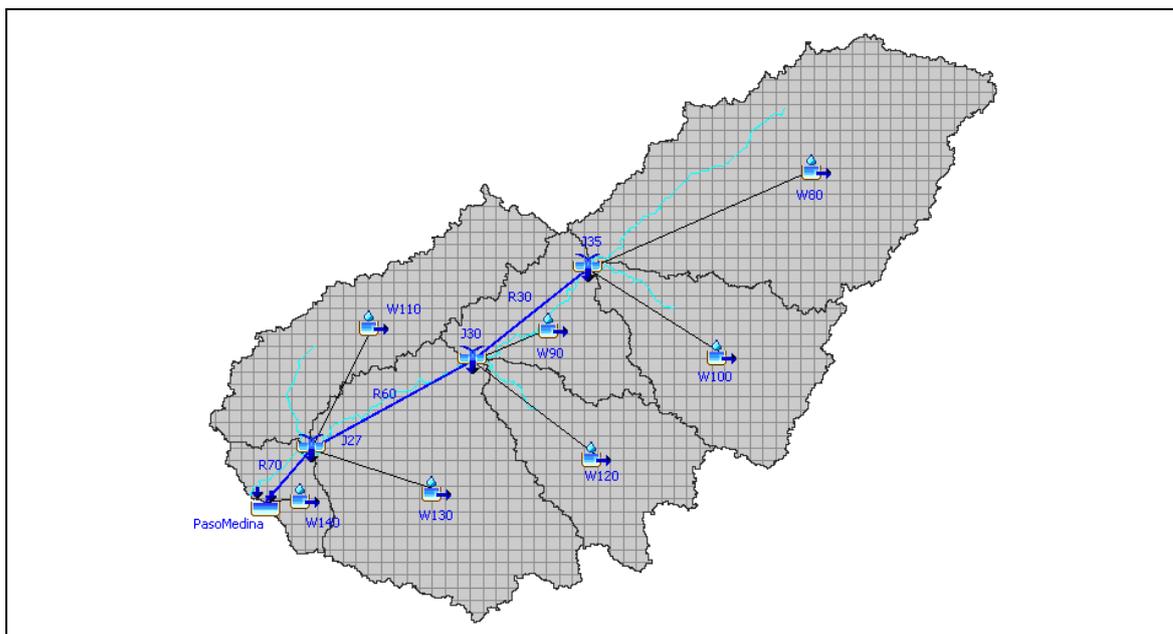


Figura 4.25: Esquema del modelo hidrológico en HEC-HMS

Capítulo 4: Metodología

El tamaño de celdas de 2Kmx2Km se denominó “tamaño base” y fue el adoptado para la calibración del modelo. A partir del mismo se realizaron otras discretizaciones de la cuenca con tamaños de celda inferiores y superiores originando los cuatro casos que se indican en Figura 4.26 que fueron utilizados para el análisis de sensibilidad del modelo distribuido a la variación del tamaño de la grilla. En este proceso la modificación del tamaño de celda se realiza sobre la grilla con la que se intercepta el modelo de cuenca original obtenido en 4.5.2.3, es decir que no se modifica el MDE, generándose una nueva discretización de la cuenca a la que se le asigna los valores de CN y precipitación en cada celda.

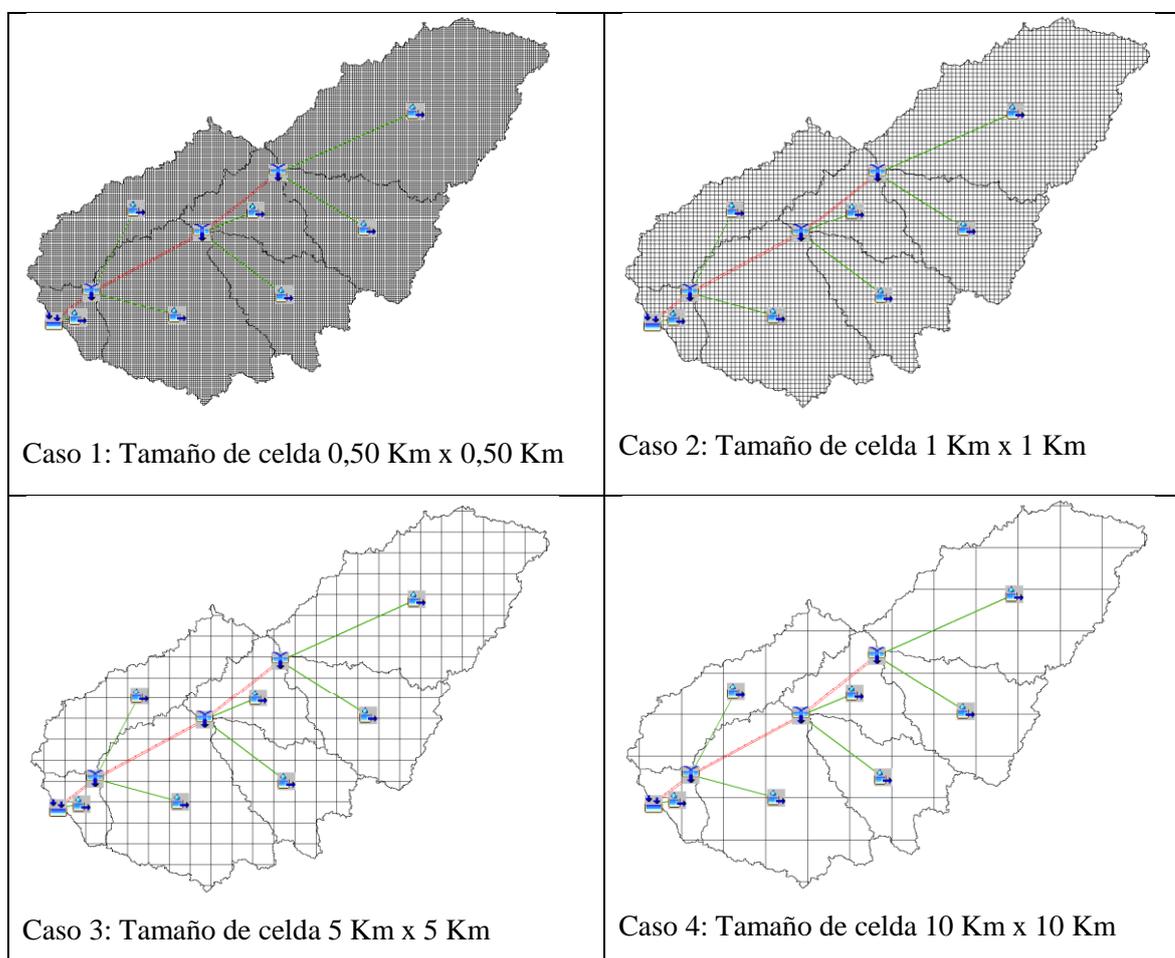


Figura 4.26: Modelos distribuidos de cuenca para distintos tamaños de grilla

4.6 ARCHIVOS EN GRILLA PARA HEC-HMS

El modelo distribuido ModClark requiere para cada celda los datos del CN y de los montos precipitados en cada intervalo de tiempo almacenados en archivos en grilla en formato DSS para HEC-HMS. Con este propósito el USACE ha desarrollado una

Capítulo 4: Metodología

aplicación denominada *asc2dssGrid.exe* que permite convertir archivos ASCII al formato DSS.

El procedimiento básicamente consiste en obtener los archivos ASCII a partir de los mapas raster de CN y de precipitaciones y luego convertirlos a DSS con la aplicación mencionada. En el manual de HEC-GeoHMS (Fleming and Doan, 2010) no se detalla la forma de ejecutarlo, posiblemente porque su aplicación está orientada al formato de datos disponibles en Estados Unidos, particularmente en lo que se refiere a la información de precipitaciones distribuidas provenientes de radar que se obtiene directamente en formato ASCII. Esta situación generó la necesidad de desarrollar para el presente estudio la metodología para obtener los archivos en formato DSS. El procedimiento aplicado se sintetiza en esta sección y en ANEXO 7 se presenta en forma detallada con el objetivo de facilitar la aplicación de ModClark en futuros estudios en nuestro país.

El primer paso fue asignar a cada celda de la cuenca los valores de CN y de precipitación distribuida. Para ello se aplicaron herramientas de ArcGIS interceptando los mapas correspondientes con la grilla en que se dividió la cuenca. El resultado fue un archivo shape polígono con un tabla de atributos donde cada celda tiene almacenado un valor de CN y un valor de precipitación para cada intervalo de tiempo.

El segundo paso fue crear los archivos ASCII con la información de CN y precipitación, lo cual fue posible mediante utilidades de HEC-GeoHMS.

Por último se realizó la conversión de archivos ASCII al formato DSS ejecutando el programa *asc2dssGrid.exe* desde en un archivo batch (*.bat) escrito previamente.

A modo de ejemplo se presenta en Figura 4.27 los productos que se fueron obteniendo en cada etapa de este proceso. En particular para la precipitación los pasos 1 y 2 se repitieron para cada intervalo de tiempo y en el paso 3 se reúnen los archivos ASCII en único archivo DSS que contiene un mapa para cada intervalo.

Capítulo 4: Metodología

4.7.1 VALORES INICIALES DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

4.7.1.1 NÚMERO DE CURVA

Los valores iniciales de CN para cada celda se definieron a partir de los mapas generados según se describió en punto 4.4.2.

4.7.1.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

4.7.1.2.1 Coeficiente de Almacenamiento

Para la estimación del coeficiente de almacenamiento en cada subcuenca se consideraron las investigaciones de Graf et al. (1982a, b) donde se determinaron valores de T_c y R para 98 cuencas de Illinois mediante calibración con HEC-1. Para reducir la interdependencia entre T_c y R definieron las variables compuestas (T_c+R) y $R/(T_c+R)$ y calcularon sus valores para las cuencas calibradas. A partir de los resultados observaron que la variable compuesta $R/(T_c+R)$ exhibía una tendencia regional variando su valor entre 0,2 y 0,7 en función de las características geológicas, topográficas y de almacenamiento de la cuenca y del desarrollo de la planicie de inundación. En particular para cuencas con características similares a las del Arroyo Feliciano, con pendientes suaves y planicies de inundación, la variable $R/(T_c+R)$ tenía un valor de 0,70 por lo que este fue el valor adoptado para el presente estudio. Como se deduce de la ecuación (4.33), adoptada para la cuenca del Arroyo Feliciano, para calcular el R es necesario estimar previamente el tiempo de concentración, con este propósito se analizaron cuatro formulaciones que se desarrollan en la sección 4.7.1.2.2.

$$\frac{R}{(T_c + R)} = 0,70 \quad (4.33)$$

4.7.1.2.2 Tiempo de Concentración

Existen diferentes expresiones para el cálculo del tiempo de concentración, en su mayoría dependientes de características físicas de la cuenca y del cauce principal. En este estudio se analizaron cuatro formulaciones con las que se generaron cuatro corridas del modelo para evaluar la que mejor ajusta.

- a) Ecuaciones derivadas de las investigaciones de Graf et al. (1982a, b).

En la investigación de Graf et al., ya comentada en 4.7.1.2.1, relacionaron la variable compuesta (T_c+R) con la longitud y pendiente del cauce aplicando técnicas de

Capítulo 4: Metodología

regresión a los resultados de las 98 cuencas calibradas. La relación hallada fue expresada con la ecuación (4.34).

$$(T_c + R) = 35,2 \cdot L^{0,39} S^{-0,78} \quad (4.34)$$

Donde:

T_c: tiempo de concentración en horas

R: coeficiente de almacenamiento en horas

L: longitud del escurrimiento medida sobre el cauce principal en millas

S: pendiente de cauce principal en pies/milla, calculada a partir de las elevaciones de los puntos ubicados al 10% y 85% de la longitud total a partir de la salida

En el método desarrollado por Graf los valores de T_c y R se calculan mediante la aplicación conjunta de la ecuación (4.34) y el valor de R/(T_c+R) que se adopte en función de las características de la cuenca. Para las subcuencas del Arroyo Feliciano se obtuvieron los valores de L y S a partir de la tabla de atributos del modelo de cuenca generado con la extensión HEC-GoeHMS en ArcGIS con lo que se resolvió la ecuación (4.34) y el valor de R/(T_c+R) se adoptó en 0,70 (ecuación (4.33)).

b) Metodología del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRSC)

En la publicación técnica 55 del NRSC (USDA-NRSC, 1986) se desarrolló el método de cálculo del tiempo de concentración a partir de la ecuación (4.35)

$$T_c = T_s + T_{sc} + T_{ch} \quad (4.35)$$

Donde:

T_s: tiempo de viaje del escurrimiento superficial

T_{sc}: tiempo de viaje del escurrimiento concentrado en cauces poco profundos

T_{ch}: tiempo de viaje de escurrimiento en canal o concentrado en cauces profundos

El escurrimiento superficial es una lámina delgada que ocurre en las cabeceras de las cuencas antes de que el flujo se concentre en canales reconocibles. Las distancias recorridas en esta forma no son superiores a los 100 m. En forma simplificada este tiempo se ha calculado como el cociente entre la longitud estimada de escurrimiento superficial y la velocidad en el terreno, este último valor se adoptó a partir de velocidades de referencia indicadas en Chow et al. (1994) en función de la cobertura y pendiente del terreno.

El escurrimiento concentrado en cauces pocos profundos es el que se genera cuando el flujo superficial comienza a concentrarse formando pequeños cursos de agua antes de llegar al cauce. La velocidad de este tipo de escurrimiento se puede estimar a partir de la

Capítulo 4: Metodología

expresión (4.36) propuesta por el NRCS para superficies no pavimentadas y que deriva de la ecuación de Manning para valores supuestos de n (0,05) y R_h (0,122 m) acordes a un escurrimiento de las características del concentrado poco profundo.

$$V_s = 4,9178 \cdot S^{0,5} \quad (4.36)$$

Donde S es la pendiente del escurrimiento en m/m. El tiempo de viaje se calcula como el cociente entre la longitud recorrida por el flujo en cauces poco profundos y la velocidad estimada. Las longitudes de este tipo de escurrimiento en las subcuencas del Arroyo Feliciano se definieron a partir del análisis visual de imágenes satelitales.

El escurrimiento en canal es el que se produce en los cauces con una sección transversal definida y que se visualiza claramente en fotos aéreas. La velocidad del escurrimiento se estimó aplicando la ecuación de Manning para un tirante a sección llena.

La metodología detallada es la indicada en el Manual de Referencia Técnica de HEC-HMS (Feldman, 2000).

c) Ecuación desarrollada en investigación de Straub et al. (2000).

Straub et al. determinaron valores del T_c y R para 39 pequeñas cuencas rurales en Illinois ($A < 6 \text{ Km}^2$) mediante calibración de un conjunto de tormentas con el modelo HEC-1. Luego aplicando técnicas de regresión lineal múltiple desarrollaron la relación matemática (4.37) que expresa el T_c como función de la longitud y la pendiente del cauce principal.

$$T_c = 1,54 \cdot L^{0,875} S^{-0,181} \quad (4.37)$$

Donde:

L : longitud total del escurrimiento en milla, medida a lo largo del canal principal desde la divisoria de cuenca hasta el punto de salida

S : pendiente del canal principal en pie/milla, calculada a partir de las elevaciones de los puntos ubicados al 10% y 85% de la longitud total a partir de la salida

Para la aplicación de la ecuación (4.37) en el Arroyo Feliciano se obtuvieron los valores de longitud y pendiente para cada subcuenca a partir de la tabla de atributos del modelo de cuenca generado con HEC-GeoHMS.

d) Fórmula de Kirpich

$$T_c = \left(0,87 \cdot \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (4.38)$$

Capítulo 4: Metodología

donde:

Tc: tiempo de concentración en horas

L: longitud del cauce principal en kilómetros

ΔH : diferencia de elevación en metros entre el punto más alejado de la cuenca y la salida

4.7.1.2.3 Valores Iniciales del Tiempo de Concentración y del Coeficiente de Almacenamiento

En Tabla 4.13 se sintetizan los pares de valores de tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento que resultan de aplicar las diferentes ecuaciones presentadas.

A cada conjunto de pares de valores determinados para las subcuencas se lo denominó “Prueba” y el objetivo fue modelar cada una de ellas en la etapa de calibración para concluir cual es la ecuación que mejor ajusta.

Tabla 4.13: Valores del coeficiente de almacenamiento y del tiempo de concentración según distintas metodologías

Sub cuenca	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
	Tc	R	Tc	R	Tc	R	Tc	R
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
	Según Graf	Para: $R/(R+Tc)=$ 0.70	Según TR55	Para: $R/(R+Tc)=$ 0.70	Según Straub	Para: $R/(R+Tc)=$ 0.70	Según Kirpich	Para: $R/(R+Tc)=$ 0.70
W80	37,99	88,65	64,00	149,33	50,36	117,51	47,09	109,88
W90	17,85	41,65	27,00	63,00	25,82	60,25	22,73	53,04
W100	27,56	64,30	29,00	67,67	32,45	75,73	28,73	67,04
W110	28,67	66,91	42,00	98,00	38,95	90,87	35,52	82,88
W120	20,16	47,04	26,00	60,67	28,82	67,26	25,71	59,99
W130	27,72	64,68	26,00	60,67	41,00	95,68	37,38	87,22
W140	8,75	20,41	9,00	21,00	13,89	32,40	11,43	26,67

4.7.1.3 PARÁMETROS DE MUSKINGUM CUNGE

El hidrograma de salida de cada subcuenca se propagó por el cauce de aguas abajo aplicando el método de Muskingum-Cunge la información requerida por este método es:

- Longitud y pendiente de cauce. Se obtuvo del modelo de cuenca procesado en HEC-GeoHMS.

Capítulo 4: Metodología

- Geometría de la sección transversal y coeficientes de rugosidad de Manning para el canal y el valle de inundación. Estos datos se estimaron a partir de imágenes satelitales y relevamientos del cauce.

4.7.2 AJUSTE DE LOS PARÁMETROS MEDIANTE CALIBRACIÓN

4.7.2.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

El ajuste de las modelaciones se evaluó a partir de los siguientes cálculos y criterios:

- Contraste de los hidrogramas simulado vs. observado. Un primer análisis de la calidad de los resultados se realizó en forma visual mediante un gráfico de superposición del hidrograma simulado y el observado.

- Coeficiente de Nash-Sutcliffe o de eficiencia definido por la ecuación (4.39) como uno menos la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores pronosticados y los observados normalizados por la varianza de los valores observados durante el período de simulación.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{om})^2} \quad (4.39)$$

Donde:

NS: Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Q_{oi}: Caudal observado en el tiempo *i*

Q_{ci}: Caudal calculado en el tiempo *i*

Q_{om}: Promedio de los caudales observados

n: número de intervalos de tiempo del hidrograma

Este índice da resultados menores o iguales a 1, si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero indica que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictiva similar al modelo y si es menor que cero implica que el valor medio de la serie habría sido un mejor predictor que el modelo.

- Error Estándar calculado con la ecuación (4.40), es un indicador que permite ver la diferencia promedio entre los caudales observados y los caudales simulados. Los valores cercanos a cero indican un buen ajuste del modelo.

$$E_e = \sqrt{\frac{\sum (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{n}} \quad (4.40)$$

Capítulo 4: Metodología

Las variables de la ecuación (4.40) tienen el mismo significado que en la ecuación (4.39).

4.7.2.2 ESCENARIO Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

4.7.2.2.1 Escenario

La calibración se realizó para la crecida de marzo 2005 y para el modelo de cuenca con el tamaño de grilla de 2 Km x2 Km. El evento pluviométrico simulado fue de tres días de duración iniciándose el 11 de marzo de 2005 y con una Precipitación Media Areal (PMA) total, obtenida de los mapas distribuidos presentados en Figura 4.17, de 177 mm. La recurrencia de este episodio se estimó en 5 años a partir de un análisis frecuencia de la serie 1980-2011 de PMA máximas anuales de 3 días de duración realizado con el programa AFMULTI (Paoli et al., 1996).

4.7.2.2.2 Procedimiento

Para contrastar los resultados del modelo se dispuso del hidrograma de escurrimiento directo en la Estación Paso Medina obtenido a partir del hidrograma observado separando el flujo base por el método de la línea recta.

Previo a la corrida del modelo en HEC-HMS se realizó un ajuste del CN comparando el valor promedio para la cuenca obtenido por dos metodologías:

1. A partir del mapa raster de CN para marzo 2005 se calculó el valor promedio para la cuenca mediante ponderación de los valores de cada celda resultando un valor de $CN_{prom.}=60,3$.

2. Aplicando el método del SCS se calculó la precipitación efectiva para la precipitación media areal. Esta última se calculó como promedio ponderado en la cuenca de los mapas de precipitación. Por otro lado se computó el Ecurrimiento Directo (ED) a partir del hidrograma observado previa separación del caudal base. Mediante un proceso iterativo se fue variando el valor de CN en el cálculo de PE hasta verificar su igualdad con el ED. El valor de CN que satisface tal condición resultó ser $CN_{prom.}=57$.

Luego, el valor de CN para el cual $PE=ED$ resultó un 5% menor que el obtenido del mapa de CN. Considerando este resultado y mediante algebra de mapa se generó un mapa de CN ajustado multiplicando el mapa original por 0,95 y a partir del mismo se creó el archivo de CN en grilla para HEC-HMS.

Capítulo 4: Metodología

La adopción de los parámetros Tc y R del modelo de transformación se realizó mediante la modelación de cuatro pruebas con los pares de valores indicados en Tabla 4.13.

4.7.2.3 ADOPCIÓN DE LOS PARÁMETROS

En función del análisis de los criterios de evaluación de la calibración establecidos en el punto 4.7.2.1 resultó la “prueba 2” la de mejor ajuste al hidrograma observado y corresponde a valores del Tc calculados por la metodología del NRSC y de R estimado para un valor de la relación $R/(Tc+R)$ igual a 0,70. En Figura 4.28 y en Tabla 4.14 se presentan los resultados del análisis de las pruebas de calibración.

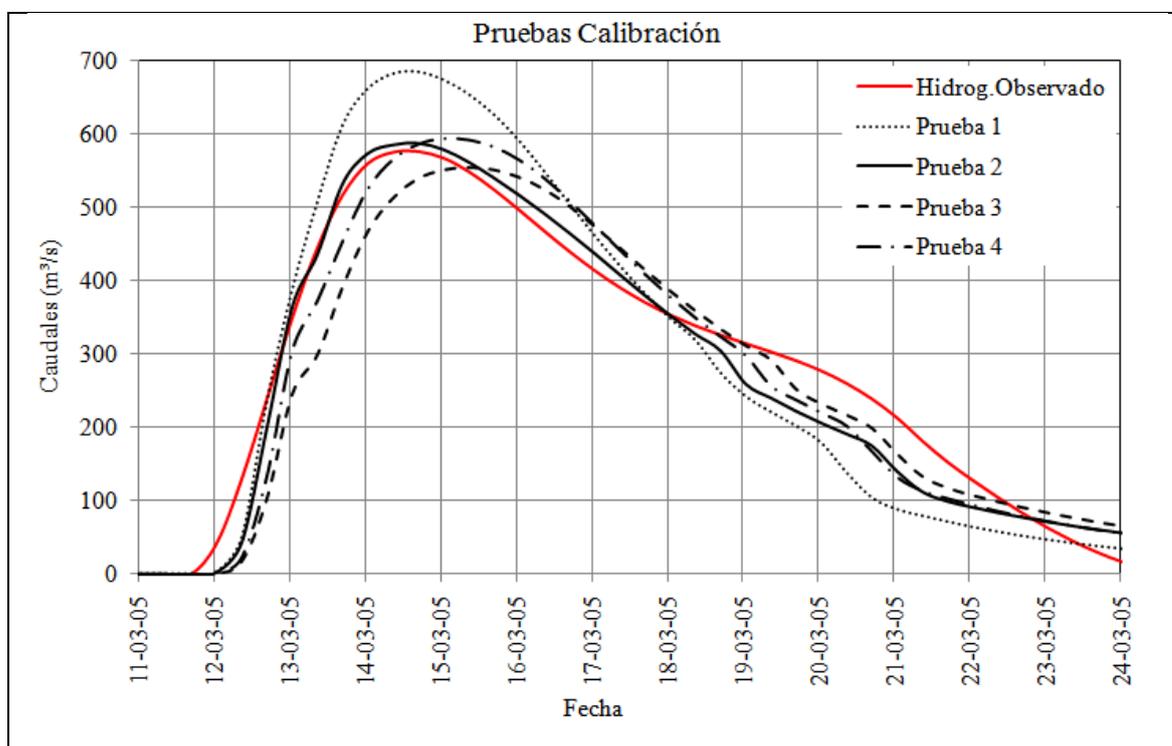


Figura 4.28: Pruebas de calibración. Análisis visual del ajuste

Tabla 4.14. Pruebas de calibración. Coeficientes de bondad de ajuste

Prueba	Coeficiente Nash	Error Estándar
	NS	Ee
	[-]	[m ³ /s]
1	0,838	74,67
2	0,954	39,75
3	0,900	58,78
4	0,923	51,38

Capítulo 4: Metodología

4.7.3 VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS ADOPTADOS

4.7.3.1 ESCENARIO

Para validar los valores de los parámetros adoptados se simuló el evento de febrero 2010 que se inicia el día 04 y concluye el día 06 produciéndose una PMA total, obtenida de los mapas distribuidos presentados en Figura 4.18, de 158 mm. La recurrencia de este episodio se estimó en 4 años.

4.7.3.2 PROCEDIMIENTO

En función del análisis realizado en la etapa de calibración se redujeron los valores del mapa de CN 2010 (Figura 4.15) en un 5%. En el modelo hidrológico se ingresaron los archivos en grilla de CN y precipitación 2010 conjuntamente con los parámetros del método de Clark calibrados. Los resultados fueron satisfactorios con un coeficiente de ajuste de Nash de 0,954 y un error estándar de 46,32 m³/s.

Adicionalmente se realizó un análisis del CN de manera similar a lo ejecutado para la fecha de calibración. Como resultado se halló que la igualdad entre el ED del hidrograma observado y la PE calculada por el método del SCS se obtenía cuando el CN del mapa original se disminuía en un 3%. La diferencia entre este valor del 3% y el 5% hallado para el escenario de calibración se explica mediante el análisis de las condiciones de humedad antecedente. El monto precipitado en los 5 días antecedentes a los eventos simulados es prácticamente igual en ambos escenarios, calibración y validación, pero difiere en la distribución temporal, como puede observarse en Figura 4.29, en la crecida de marzo 2005 en los 2 días previos al evento analizado prácticamente no se produjeron lluvias mientras que si se registraron en febrero 2010 por lo que se estima que en el primer caso los suelos se habrían encontrado con menor grado de humedad al momento de iniciarse el evento simulado.

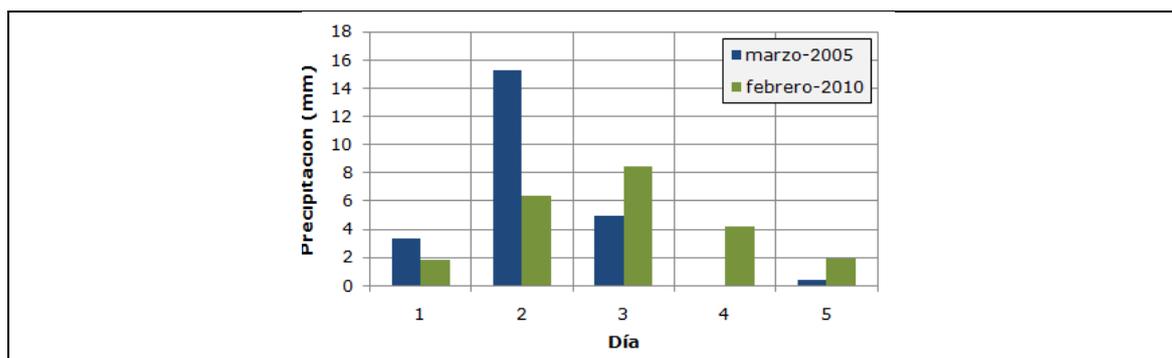


Figura 4.29: Precipitación antecedente en los escenarios de calibración y validación

Capítulo 4: Metodología

Como una segunda prueba de validación se modeló el evento de febrero 2010 pero con valores de CN que resultan de disminuir en un 3% los valores originales. Los resultados arrojaron una mejora en el ajuste del modelo.

Los coeficientes de bondad de ajuste de las pruebas de validación se sintetizan en Figura 4.30 y en Tabla 4.15. En ambos casos se obtiene un resultado satisfactorio con una optimización cuando se ajusta el valor de CN a partir del escurrimiento directo observado. El análisis realizado permitió evidenciar la sensibilidad del modelo a los valores del CN y la incidencia de las condiciones de humedad antecedente.

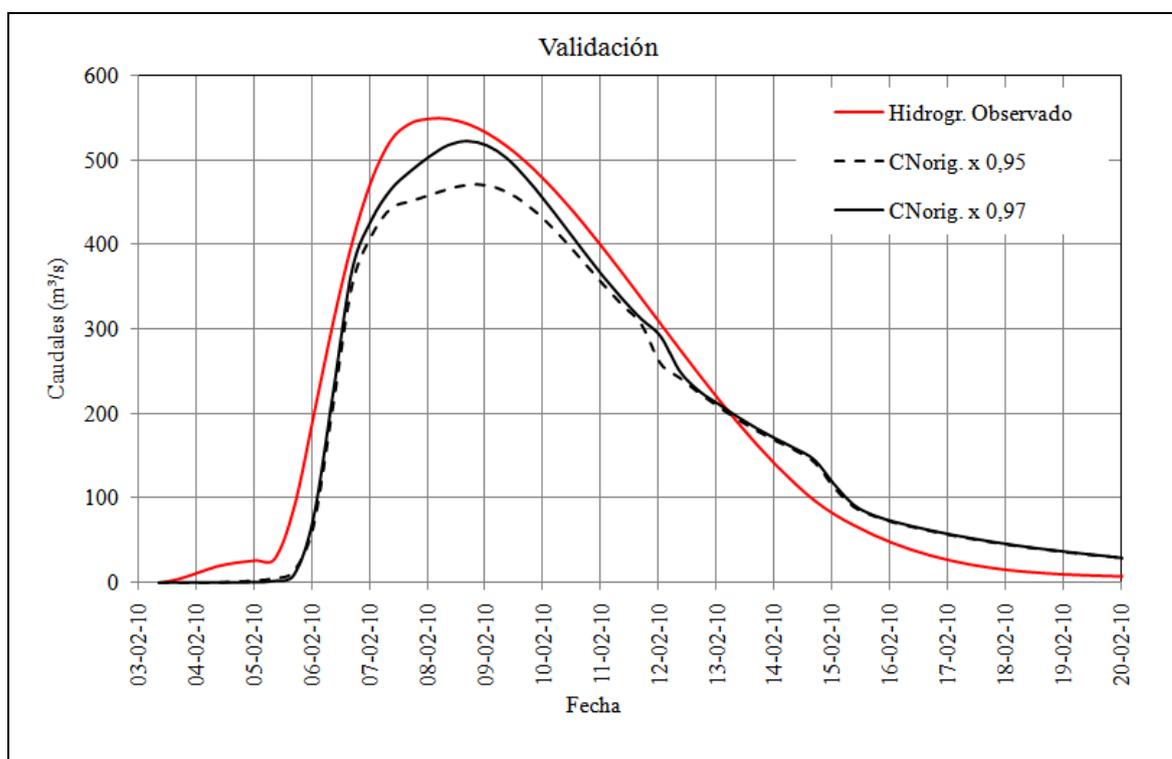


Figura 4.30: Validación. Análisis visual del ajuste

Tabla 4.15: Validación. Coeficientes de bondad de ajuste

Prueba	Coeficiente Nash	Error Estándar
	NS	Ee
	[-]	[m ³ /s]
1) CN=0,95xCN ₂₀₁₀	0,945	46,32
2) CN=0,97xCN ₂₀₁₀	0,968	35,45

Capítulo 4: Metodología

4.8 DESARROLLO DEL MODELO AGREGADO

La implementación del modelo agregado tiene por finalidad evaluar las posibles mejoras del modelo distribuido respecto del primero. En función de este objetivo se desarrolló un modelo agregado con el mismo esquema de subcuencas e igual parametrización que el distribuido.

El modelo de cuenca se obtuvo aplicando HEC-GeoHMS de igual forma a lo realizado en el modelo distribuido y con la misma información de base.

La crecida modelada fue la de marzo 2005 empleada en el proceso de calibración del modelo distribuido.

Los datos de precipitación y los parámetros requeridos para la modelación en HEC-HMS se obtuvieron con los procedimientos que se desarrollan a continuación.

4.8.1 VALORES DE CN PARA EL MÉTODO DEL SCS AGREGADO

Los CN para cada subcuenca se obtuvieron a partir del mapa ajustado de CN mediante funciones de análisis espacial en SIG que calculan el promedio ponderado de los valores de los píxeles del mapa de CN en el área de la subcuenca.

4.8.2 PARÁMETROS DEL MODELO AGREGADO DE CLARK

El método de transformación de la escorrentía superficial del Hidrograma Unitario Clark aplicado en la modelación agregado utiliza los mismos parámetros que el distribuido ModClark. Se adoptaron, entonces, los valores de T_c y R obtenidos por optimización del modelo distribuido.

4.8.3 DATOS DE PRECIPITACIÓN

La información de la tormenta se ingresó en la forma de hietograma de la PMA para cada subcuenca con intervalos de tiempo iguales a los considerados en el modelo distribuido ($\Delta t=8$ hs). La PMA en cada intervalo se calculó de dos maneras creándose dos modelos meteorológicos:

Modelo Meteorológico 1: la PMA en cada intervalo se computó como promedio ponderado, en el área de la subcuenca, de los valores de los píxeles de los mapas de precipitación (Figura 4.19) que fueran creados para el modelo distribuido.

Modelo Meteorológico 2: la PMA en cada intervalo se calculó aplicando la metodología de los polígonos de Thiessen a los datos de las estaciones pluviométricas. Los

Capítulo 4: Metodología

polígonos fueron determinados mediante herramienta SIG y el resultado se presenta en Figura 4.31.

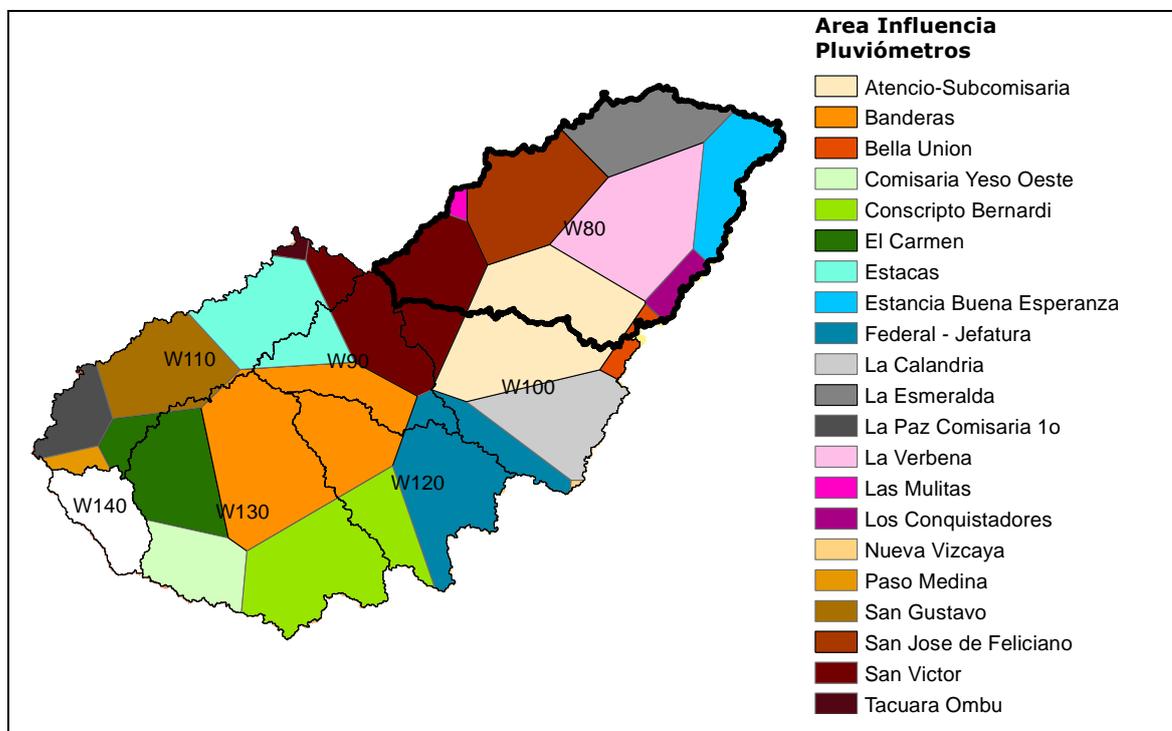


Figura 4.31: Polígonos de Thiessen en la cuenca del Arroyo Feliciano

A modo de ejemplo se grafican en Figura 4.32 los hietogramas del episodio de marzo 2005 para la subcuenca W80 determinados por ambas metodologías.

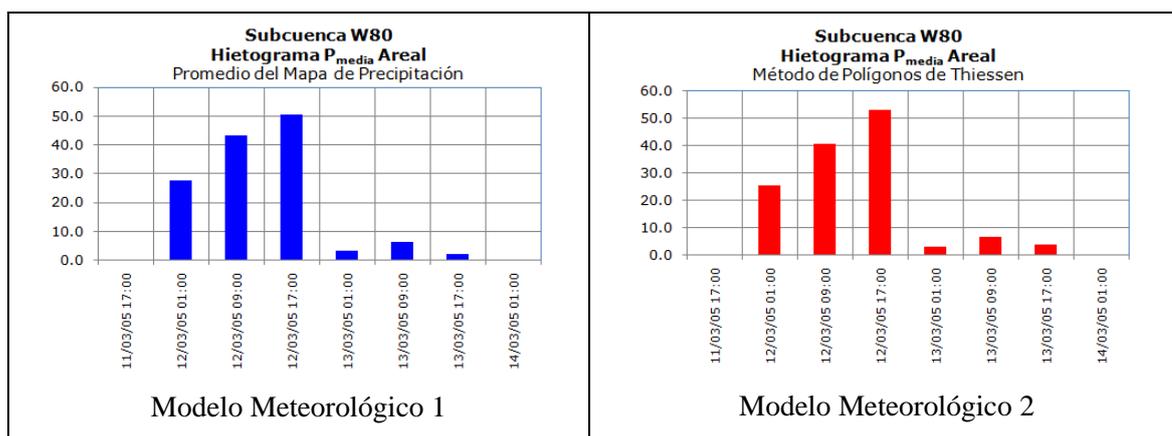


Figura 4.32: Hietogramas para la subcuenca W80

4.9 EXPLOTACIÓN DE LOS MODELOS DISTRIBUIDO Y AGREGADO

Para cumplir con los objetivos planteados se realizaron corridas del modelo hidrológico distribuido para los tamaños de celda definidos en 4.5.2 para analizar la

Capítulo 4: Metodología

sensibilidad a la resolución espacial y se ejecutó el modelo agregado elaborado en 4.8 para evaluar la performance del modelo distribuido respecto al agregado.

Para cada uno de los modelos se simularon dos escenarios que se detallan a continuación.

4.9.1 ESCENARIO MARZO 2005

Este escenario refiere a la simulación de la tormenta del 11 al 13 de marzo de 2005 con el objetivo de evaluar la precisión de los resultados de cada modelo a partir del contraste con la información obtenida en la estación Paso Medina.

4.9.2 ESCENARIO FICTICIO

Con el propósito de evaluar la influencia de la variabilidad espacial de los valores de CN sobre las diferencias entre los resultados de los modelos distribuido y agregado y en la sensibilidad al tamaño de celda se generó un escenario denominado “ficticio” que difiere del real en los valores de CN. Para el nuevo escenario se elaboró el mapa de CN de Figura 4.33 con una resolución espacial de 2 Km, en el cuál los valores asignados a cada píxel fueron arbitrarios, variables entre 35 y 100 y distribuidos heterogéneamente en el espacio. El valor promedio de CN ficticio ponderado en la cuenca se mantuvo en el rango del hallado para marzo 2005 pero la diferencia impuesta entre ambos escenarios fue la mayor dispersión en los valores de CN para el caso ficticio.

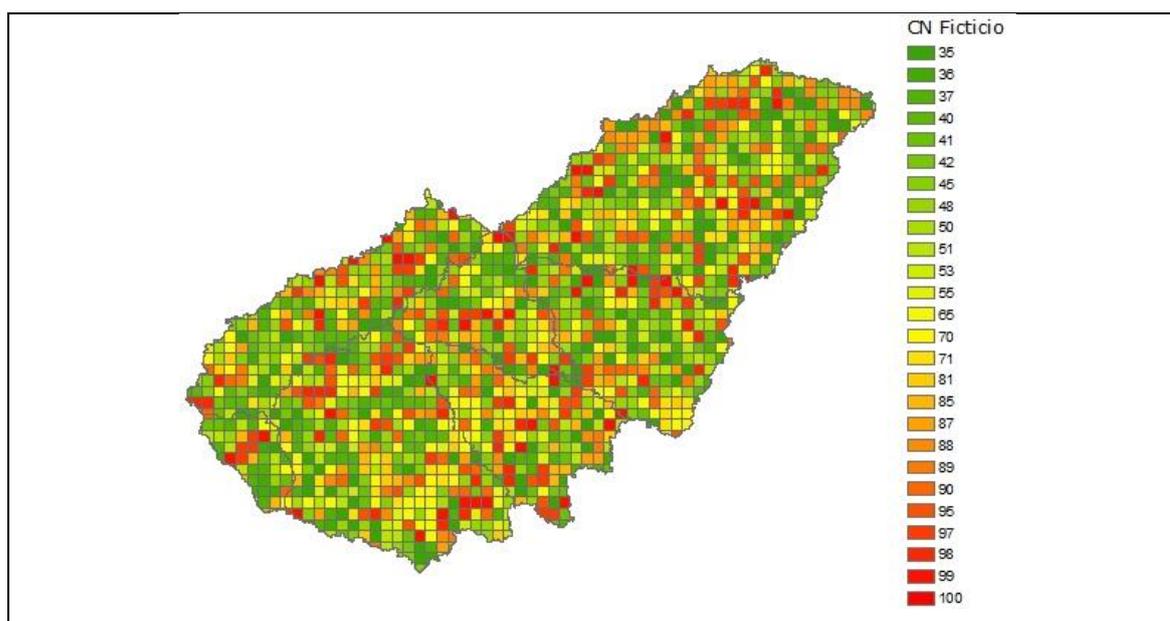


Figura 4.33: Mapa de CN para el escenario ficticio

 Capítulo 4: Metodología

La heterogeneidad de los valores de CN en el área de las subcuencas se evaluó mediante los resultados de los estadísticos, desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV), calculados con las ecuaciones (4.41) y (4.42). A mayor valor del CV mayor heterogeneidad de los valores de la variable e inversamente a menor CV, mayor homogeneidad.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{N}} \quad (4.41)$$

$$CV = \frac{\sigma}{X_m} \quad (4.42)$$

Donde:

σ : desviación estándar

CV: coeficiente de variación

X_i : valor de la variable en un pixel del mapa

X_m : valor medio de la variable

N : número total de valores

Los valores de los estadísticos del mapa de CN ficticio se compararon en Tabla 4.16 con los correspondientes al escenario 2005 verificándose la mayor heterogeneidad deseada en el primero a través de mayores valores del CV.

Tabla 4.16: Análisis del grado de heterogeneidad del CN para los mapas de marzo 2005 y ficticio

Subcca.	CN ₂₀₀₅			CN _{FICTICIO}		
	Media	σ	CV	Media	σ	CV
W80	62,3	7,6	12%	61,4	22,5	37%
W90	57,7	9,1	16%	63,0	22,7	36%
W100	60,6	5,5	9%	60,5	22,1	36%
W110	61,8	6,7	11%	59,6	22,1	37%
W120	57,8	4,4	8%	64,7	22,6	35%
W130	59,5	7,4	12%	61,2	21,8	36%
W140	55,8	16,0	29%	56,6	22,9	40%

En el escenario ficticio el mapa de CN elaborado se utilizó para asignar los valores de CN a cada celda del modelo distribuido y obtener los promedios ponderados para las

Capítulo 4: Metodología

subcuencas del agregado. Los demás datos del modelo hidrológico incluyendo los archivos de precipitación se mantuvieron iguales a los del escenario de marzo 2005.

4.10 CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados se orientó al cumplimiento de los objetivos de esta tesis: evaluar el desempeño del modelo distribuido y la influencia de la discretización espacial sobre los resultados. Para ello se realizó un estudio comparativo de los modelos distribuido y agregado y un análisis de la sensibilidad del primero a la variación del tamaño de celda aplicando los procedimientos que se exponen a continuación en las secciones 4.10.1 y 4.10.2. La interpretación de los resultados se basó en la valoración de los criterios que se desarrollan en la sección 4.10.3.

4.10.1 MODELO AGREGADO VERSUS DISTRIBUIDO

4.10.1.1 ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS

La evaluación del desempeño del modelo distribuido frente a un modelo agregado se realizó analizando la precisión de los hidrogramas simulados en relación al observado en la Estación Paso Medina durante el evento de marzo 2005. Los criterios adoptados para valorar la bondad de ajuste se detallan en la sección 4.10.3.1.

El modelo distribuido evaluado fue el correspondiente al tamaño de grilla de 2Kmx2Km.

En el modelo agregado, la entrada de la precipitación se realizó en las dos variantes definidas en la sección 4.8.3 con el fin de analizar simultáneamente la incidencia en los resultados al aplicar diferentes metodologías para la obtención de la PMA.

4.10.1.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD DE LOS DATOS EN LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS

Los datos requeridos en formato distribuido para la modelación con ModClark son la precipitación y el CN. En el modelo agregado estos datos son ingresados como promedios ponderados a nivel de subcuenca. Para evaluar el comportamiento de las diferencias en los resultados de los modelos cuando se incrementa la variabilidad de algunos de estos datos, se realizó la explotación de ambos, distribuido y agregado, para el escenario ficticio desarrollado en la sección 4.9.2.

Capítulo 4: Metodología

A partir de los resultados de las simulaciones se calcularon las Diferencias Porcentuales en la Precipitación en Exceso (DPPE) en la forma indicada en la sección 4.10.3.2 y se contrastaron con las obtenidas en el escenario 2005 de menor variabilidad en los datos.

4.10.1.3 ANÁLISIS DE LAS MEJORAS DEL MODELO DISTRIBUIDO RESPECTO AL AGREGADO

Los avances en la simulación con el modelo distribuido de HEC-HMS respecto al agregado se focalizan en dos etapas de la modelación, una es el cálculo de la precipitación efectiva con el método del CN en grilla y la otra es la transformación en el hidrograma de escurrimiento directo con la aplicación del método de ModClark.

El cálculo de la precipitación efectiva en el modelo distribuido se realiza a nivel de celda en función de los valores de CN y de precipitación asignados a la misma mientras que en el modelo agregado es a nivel de subcuenca. El efecto de esta modificación se evaluó implícitamente en el punto anterior al analizar las diferencias en los valores calculados de PE con los métodos distribuido y agregado.

En el método de ModClark se realiza la traslación de la precipitación en exceso y el tránsito del hidrograma en un reservorio lineal. En este proceso la diferencia entre el método distribuido y el agregado tiene lugar en la etapa de traslación de la precipitación hasta la salida de la cuenca, en el primero se realiza en función del tiempo de viaje de cada celda (Ecuación (4.15)) mientras que el segundo utiliza un Histograma Área-Tiempo Sintético definido por el HEC (Figura 4.2). El tránsito del escurrimiento por el reservorio lineal se realiza de igual manera en ambos modelos utilizando el mismo valor del coeficiente de almacenamiento.

Para analizar la influencia de la modificación introducida en el método de traslación se generó un modelo distribuido con la condicionante que la lluvia en exceso resulte igual a la del agregado con la finalidad de eliminar de los resultados las diferencias debidas al método de cálculo de la PE. Con este propósito se asignó a cada celda valores de precipitación y CN uniformes a nivel de subcuenca e iguales a los promedios ponderados ingresados en el modelo agregado.

El escenario simulado fue el ficticio y las diferencias entre los métodos distribuido y agregado de traslación se evaluaron mediante el contraste de los hidrogramas.

Capítulo 4: Metodología

4.10.2 SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

4.10.2.1 EFECTO DEL TAMAÑO DE CELDA EN LA PRECISIÓN DE LOS RESULTADOS

Para analizar la sensibilidad del modelo distribuido a la variación del tamaño de celda se generaron los modelos hidrológicos para el escenario marzo 2005 para los diferentes casos de discretización de la cuenca definidos en 4.5.2.4.

La influencia del tamaño de la celda sobre los resultados del modelo se evaluó contrastando los hidrogramas resultantes con el observado durante el evento simulado. Los criterios adoptados para el análisis de la bondad de ajuste se exponen en la sección 4.10.3.1.

4.10.2.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL CN EN LA SENSIBILIDAD DEL MODELO

La incidencia de la heterogeneidad de los valores de CN sobre los resultados del modelo se evaluó comparando su comportamiento en dos escenarios, el 2005 y el ficticio, diferenciados por el coeficiente de variación de los valores de CN. Se realizaron simulaciones para los cinco casos con diferentes tamaños de celda. La variable analizada en los resultados fue la precipitación en exceso por ser influenciada en forma directa por el CN y el parámetro de comparación fue la DPPE calculada con la expresión indicada en la sección 4.10.3.2 siendo el modelo de referencia el de grilla de 2Kmx2Km.

Para establecer si la mayor heterogeneidad espacial en los valores de CN produce modelos distribuidos más sensibles al tamaño de celda, se contrastaron las DPPE de cada escenario y se analizó la posible correspondencia con los CV de los mapas de CN.

4.10.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

4.10.3.1 ANÁLISIS DE LA BONDAD DE AJUSTE

El grado de exactitud entre los valores simulados y los observados se determinó mediante criterios de evaluación numéricos y gráficos. En cada simulación se calcularon los errores del caudal y tiempo al pico con las ecuaciones (4.43) y (4.44). El ajuste del hidrograma simulado al observado se evaluó mediante el análisis visual y se cuantificó por el cómputo del coeficiente Nash-Sutcliffe y del error estándar definidos con las expresiones (4.39) y (4.40) respectivamente que fueron detalladas en el proceso de calibración.

 Capítulo 4: Metodología

$$E_{Qp} = \frac{Q_{pc} - Q_{po}}{Q_{po}} \times 100 \quad (4.43)$$

$$E_{Tp} = \frac{T_{pc} - T_{po}}{T_{po}} \times 100 \quad (4.44)$$

Donde:

E_{Qp} : error en el caudal pico

E_{Tp} : error en el tiempo al pico

Q_{po} : caudal pico observado

Q_{pc} : caudal pico calculado

T_{po} : tiempo al pico observado

T_{pc} : tiempo al pico calculado

El modelo más preciso será aquel para el cual los errores son menores y el coeficiente de Nash es más cercano a la unidad.

4.10.3.2 DIFERENCIA PORCENTUAL EN LA PRECIPITACIÓN EN EXCESO

Las diferencias en los resultados del cálculo de la precipitación efectiva entre dos modelos que se comparan se evalúo mediante el cómputo de la DPPE con la expresión (4.45).

$$DPPE = \frac{PE_{Mi} - PE_{Mj}}{PE_{Mj}} \times 100 \quad (4.45)$$

Donde:

$DPPE$: diferencia porcentual en la lámina de precipitación efectiva del modelo “i” respecto del modelo “j”

PE_{Mi} : precipitación efectiva resultante del modelo “i” que se compara

PE_{Mj} : precipitación efectiva resultante del modelo “j” de referencia

Capítulo 5: Resultados y Discusión

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIALIZADA

5.1.1 MAPAS DE NÚMERO DE CURVA

En este estudio se elaboraron mapas de CN distribuidos para dos condiciones de la cuenca, una correspondiente a la fecha seleccionada para la calibración del modelo (marzo 2005) y otra para la de validación (febrero 2010), considerando que entre ambos eventos hay una diferencia en el tiempo de 5 años en los que podría haberse registrado un cambio en el uso de suelos.

La generación de los mapas se realizó a partir de la elaboración previa de dos capas de información: usos de suelos y tipos hidrológicos de suelos.

Los mapas de usos de suelos se obtuvieron a partir de la interpretación de imágenes satelitales con fechas de captura cercanas a las analizadas y aplicando técnicas de clasificación supervisada. Los resultados evidenciaron que el mayor porcentaje de la cuenca está ocupado por monte abierto y que entre los años 2005 y 2010 se ha producido una modificación en el uso de los suelos disminuyendo el área cubierta por montes cerrados y abiertos en correspondencia con un aumento de las superficies de pastizales y cultivos.

La agrupación de los suelos de la cuenca desde el punto de vista hidrológico se realizó comparando las descripciones de los perfiles edafológicos del mapa de suelos (SAGyP e INTA, 1990) con las características de los grupos hidrológicos (USDA-NRSC, 2009). La mayor proporción de los suelos de la cuenca se agrupan como tipo C que son suelos que tienen un potencial escurrimiento moderadamente alto.

La información generada permitió conocer para cada punto del espacio de la cuenca el uso y el tipo de suelo y de esta manera asignarle un valor de CN en base a los valores propuestos por el SCS (USDA-NRSC, 2004a). En la adopción de los valores de CN se consideró la condición de humedad antecedente para cada evento simulado para lo cual se analizaron las precipitaciones registradas en los pluviómetros durante los cinco días precedentes resultando en ambos casos, calibración y validación, una AMC clasificada como I (seca).

El mayor porcentaje de la cuenca presentó valores de CN entre 55 y 70, el valor promedio ponderado para toda la cuenca fue de 60,2 para la condición de marzo 2005 y 62,7 para febrero 2010. El coeficiente de variación de los valores de CN se calculó en 13%

Capítulo 5: Resultados y Discusión

para el mapa del 2005 y 16% para el 2010 pudiendo clasificarse en ambos casos como mapas de muy baja heterogeneidad en los valores de sus píxeles.

5.1.2 MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA

Los eventos de precipitación seleccionados para las simulaciones de calibración y validación del modelo distribuido fueron las tormentas del 11 al 13 de marzo de 2005 y del 04 al 06 de febrero de 2010 respectivamente.

Los datos de precipitaciones disponibles correspondieron a montos diarios observados en la red pluviométrica de la provincia de Entre Ríos. La aplicación del modelo distribuido requiere contar con la información de precipitación distribuida espacialmente de manera que fue necesario realizar la interpolación espacial de los datos puntuales para transformar un campo discreto de observaciones pluviométricas en un mapa continuo. Con este propósito se aplicaron técnicas geoestadísticas que a diferencia de la estadística clásica tiene en cuenta la correlación espacial entre los valores observados permitiendo una mejor representación del fenómeno.

El primer paso en la aplicación de la técnica de interpolación fue el análisis de la calidad de los datos pluviométricos, en este proceso se eliminaron las estaciones que resultaron con datos dudosos quedando conformadas series con 33 pluviómetros para el evento 2005 y 35 para el 2010 las cuales verificaron, además, las hipótesis del método geoestadístico. Los montos diarios de precipitación de cada pluviómetro se discretizaron en intervalos de 8 horas en función de patrones de distribución temporal definidos a partir de registros de faja pluviográfica y estación automática disponibles para la fecha de los eventos quedando conformadas siete series temporales para la tormenta de marzo 2005 (duración total: 56 hs) y ocho para la de febrero 2010 (duración total: 64 hs).

Para cada serie temporal se construyeron los semivariogramas experimentales que permitieron seleccionar las funciones estadísticas que mejor representaron la correlación espacial de los datos pluviométricos, estas fueron la Gaussiana y la Stable. Los modelos teóricos adoptados fueron considerados en el proceso de interpolación espacial por el método de Kriging obteniéndose los mapas raster de precipitación espacialmente distribuida en cada intervalo de tiempo. La fiabilidad de los mapas fue verificada mediante validación cruzada con resultados satisfactorios, los valores calculados del MSE resultaron próximos a cero (el mayor valor fue de 0,05) y los de RMSSE se mantuvieron cercanos a 1 (el mayor valor fue de 1,13).

Capítulo 5: Resultados y Discusión

En ambas tormentas analizadas se observaron situaciones particulares en los intervalos finales del evento donde las precipitaciones se debilitaron hacia el cese del fenómeno, hubo registros en algunos pocos pluviómetros que además se ubicaron dispersos y distantes y con montos precipitados de escasa magnitud. Las series en estos intervalos no verificaron las hipótesis del método geoestadístico y mejores resultados se obtuvieron con la aplicación del método determinístico IDW. Esta situación se dio en las dos últimas series temporales del evento marzo 2005 y en la última del 2010, en los tres casos con escasa significación para la simulación de la tormenta por los bajos montos precipitados en dichos intervalos en relación al monto total del evento.

5.2 RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO

La primera simulación con el modelo distribuido, que se denominó **MD2K**, se realizó para el modelo de cuenca discretizada en celdas de 2Kmx2Km (Figura 4.24) y el evento observado de marzo 2005 con el cual se ajustaron los parámetros.

La entrada de la tormenta registrada se realizó en archivos de formato de HEC-HMS para datos en grilla originados a partir de mapas raster de precipitación distribuida elaborados mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas a los datos pluviométricos.

La parametrización del modelo se ejecutó mediante técnica de optimización manual utilizando ajuste visual del hidrograma y el cálculo del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe y del error estándar.

Los parámetros ajustados fueron el Número de Curva del método del SCS para el cálculo de la precipitación en exceso y el coeficiente de almacenamiento del método de ModClark conjuntamente con el tiempo de concentración.

El valor inicial del CN en cada celda se determinó interceptando la grilla de 2Kmx2Km con el mapa de CN distribuido elaborado para la fecha de calibración. Para ajustar este parámetro se estimó el valor promedio del mismo para el cual la precipitación efectiva calculada con la metodología del SCS resulta igual al escurrimiento directo calculado a partir del hidrograma observado. El valor de CN que satisfizo la igualdad fue 57, lo que resultó un 5% inferior al valor inicial calculado con el mapa. A partir del análisis realizado los valores iniciales de CN en cada celda fueron disminuidos en dicha proporción.

El T_c se evaluó mediante cuatro formulaciones (Graf, NRSC, Straub y Kirpich) y el R se estimó en cada caso para un valor de la variable compuesta $R/(T_c+R)$ igual a 0,70 propuesto por Graf et al. (1982b) para cuencas con pendientes suaves y extensas planicies

Capítulo 5: Resultados y Discusión

de inundación. El resultado más preciso se obtuvo para la prueba con los tiempos de concentración calculados según metodología del NRSC.

El ajuste del hidrograma se evaluó visualmente por contraste con el observado en Figura 5.1 y cuantitativamente mediante el cálculo del coeficiente de Nash y error estándar que se consignan en Tabla 5.1 conjuntamente con los valores de caudal máximo y tiempo al pico que se compararon con los valores observados computando los errores.

El hidrograma simulado presentó una precisión satisfactoria con un coeficiente de Nash de 0,954 y un error estándar de 39,74 m³/s. El error en el caudal pico fue de 1,97% y el tiempo al pico simulado coincidió con el observado.

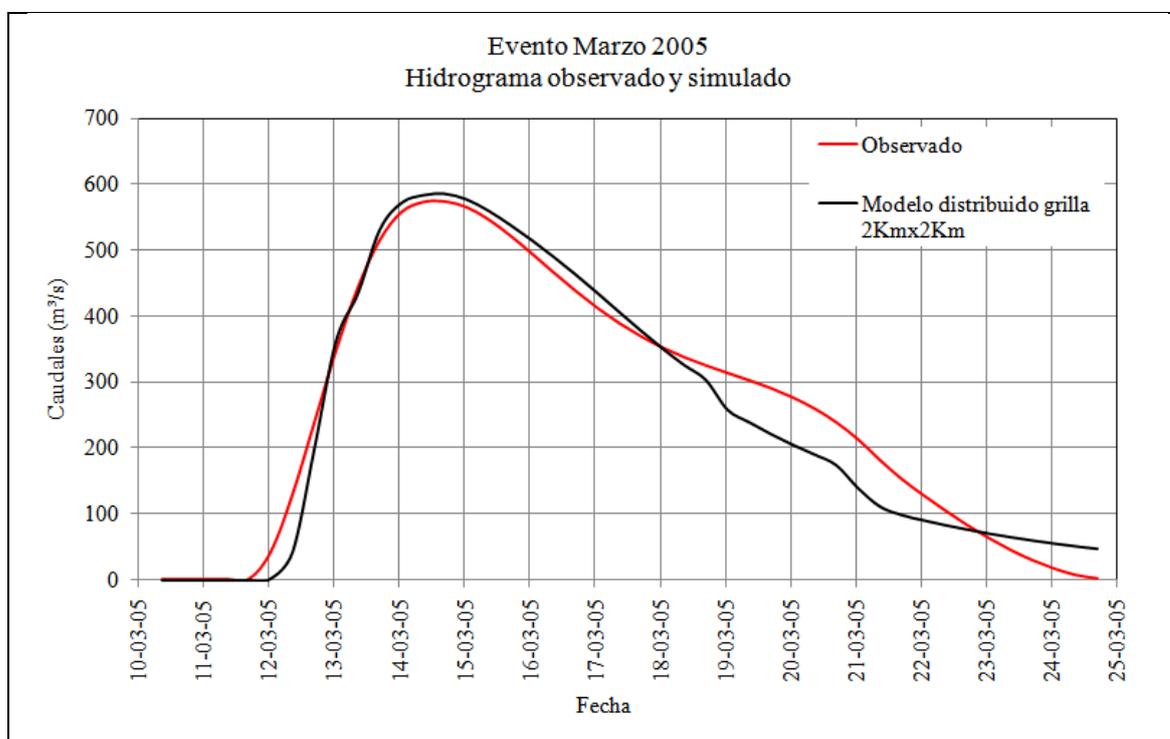


Figura 5.1: Escenario marzo 2005. Hidrogramas observado y modelado

Tabla 5.1: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste del modelo distribuido

Modelo	Caudal Pico		Tiempo al Pico		Error en el caudal pico	Error en tiempo al pico	Coefic. Nash	Error Estándar
	Observ.	Calculado	Observ.	Calculado	EQp	ETp	NS	Ee
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[h]	[h]	[%]	[%]	[-]	[m ³ /s]
MD2K	574,79	586,10	104	104	1,97%	0,00%	0,954	39,74

Capítulo 5: Resultados y Discusión

Los parámetros adoptados se validaron en el modelo generado con los archivos de precipitación de febrero 2010 y de CN correspondiente a dicha fecha. El valor inicial de este último parámetro se disminuyó en un 5% en función del análisis realizado en el escenario de calibración. El resultado del análisis de la bondad de ajuste fue adecuado con un coeficiente de Nash de 0,945 y un error estándar de 46,32 m³/s.

5.3 MODELO AGREGADO VERSUS MODELO DISTRIBUIDO

5.3.1 ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS

En esta sección se evalúan los resultados de los modelos hidrológicos distribuido y agregado implementados para el evento de marzo 2005.

El modelo distribuido analizado fue el **MD2K** mientras que el modelo agregado se desarrolló para los dos modelos meteorológicos descritos en la sección 4.8.3 generándose las simulaciones designadas como **MA1** y **MA2** que se corresponden con los modelos meteorológicos 1 y 2 respectivamente, en el primero se calculó la PMA como promedio ponderado del mapa de precipitación distribuida y en el segundo con la metodología de los polígonos de Thiessen.

En Tabla 5.2 se sintetizan los coeficientes de bondad de ajuste al hidrograma observado para el modelo distribuido y para las dos simulaciones del modelo agregado.

El modelo distribuido presentó la mayor precisión aunque sin una diferencia significativa con el modelo agregado MA1. Los hidrogramas de ambos modelos prácticamente se superponen (Figura 5.2).

El resultado del modelo agregado MA2 exhibió un desfase en el tiempo al pico, el mayor error en el Q_p y el menor coeficiente de Nash. En este análisis se debe tener en cuenta que la mayor precisión del MA1 es a costo de un mayor trabajo en el procesamiento de la información ya que los hietogramas derivan de un análisis espacial previo de la precipitación.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

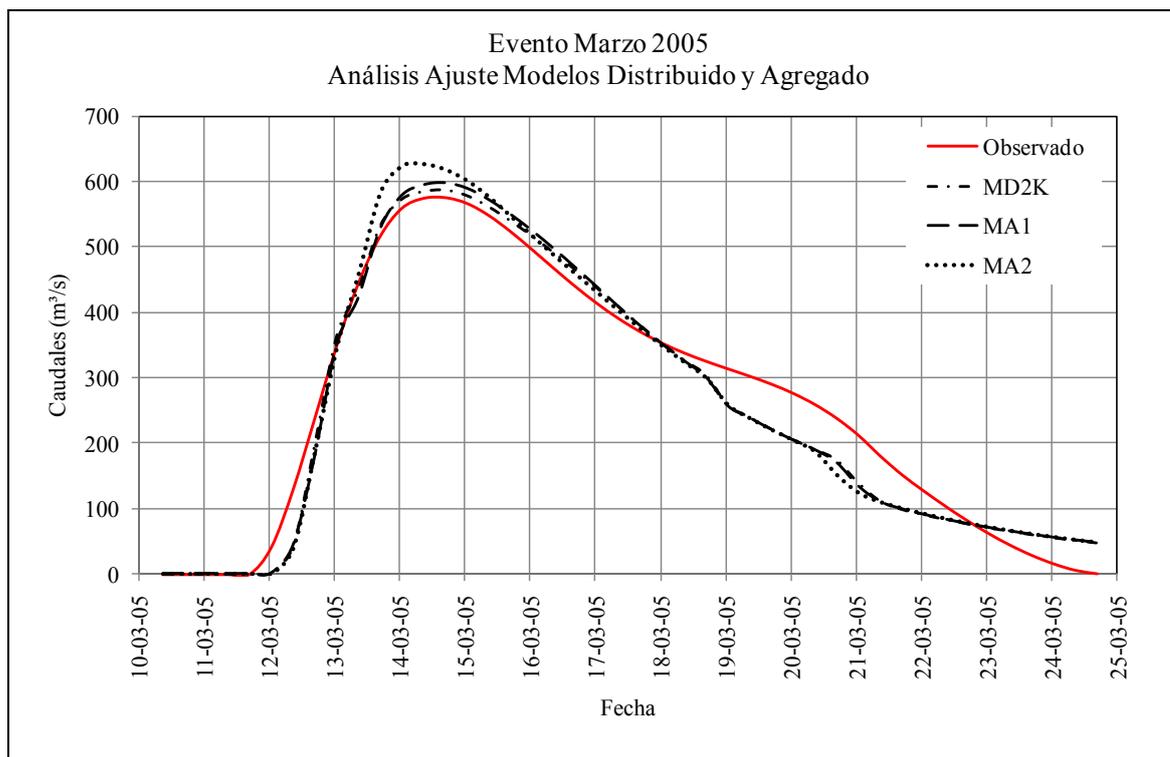


Figura 5.2: Escenario marzo 2005. Análisis visual del ajuste de los modelos distribuido y agregado

Tabla 5.2: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste de los modelos distribuido y agregado

Modelo	Caudal Pico		Tiempo al Pico		Error en el caudal pico	Error en el tiempo al pico	Coef. Nash	Error Estándar
	Observ.	Calculado	Observ.	Calculado	EQp	Etp	NS	Ee
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[h]	[h]	[%]	[%]	[-]	[m ³ /s]
MD2K	574,79	586,10	104	104	1,97%	0,00%	0,954	39,74
MA1	574,79	597,70	104	104	3,99%	0,00%	0,949	42,01
MA2	574,79	626,50	104	96	9,00%	-7,69%	0,938	46,34

 Capítulo 5: Resultados y Discusión

5.3.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD DEL CN EN LAS DIFERENCIAS ENTRE LOS MODELOS

Los modelos MD2K y MA1 analizados en la sección anterior para el escenario real de marzo 2005 se implementaron luego para el escenario ficticio originando los modelos MD2K_Fict y MA1_Fict. En Tabla 5.3 se calcularon las DPPE en cada subcuenca y para cada escenario y se consignan además los coeficientes de variación de los mapas de CN correspondientes.

Tabla 5.3: Escenarios marzo 2005 y ficticio. Análisis de las DPPE

Sub-Cca	Precip. Total	ESCENARIO 2005				ESCENARIO FICTICIO			
		Coefic. Variac. Mapa CN	Precipitación en Exceso		Difer. Porc. Precip. Exceso	Coefic. Variac. Mapa CN	Precipitación en Exceso		Difer. Porc. Precip. Exceso
			MD2K	MA1			MD2K_Fict	MA1_Fict	
		P	CV	PE	PE	DPPE	CV	PE	PE
[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[%]	
W80	133,6	12%	35,8	35,6	-0,6%	37%	48,1	39,6	-17,7%
W90	193,1	16%	63,8	63,5	-0,5%	36%	89,3	85,4	-4,4%
W100	149,2	9%	41,8	41,8	0,0%	36%	54,8	47,8	-12,8%
W110	211,4	11%	87,6	87,2	-0,5%	37%	91,9	89,8	-2,4%
W120	184,7	8%	58,4	58,1	-0,5%	35%	87,9	83,4	-5,1%
W130	218,2	12%	86,1	85,8	-0,3%	36%	101,5	99,8	-1,7%
W140	214,5	29%	74,2	72,9	-1,8%	40%	86,0	83,3	-3,1%

En el escenario 2005 las láminas de PE obtenidas con el método agregado difieren por defecto de los valores calculados con el modelo distribuido pero con escasa significancia, la máxima diferencia fue del 1,8%. En el escenario ficticio se incrementaron los valores de DPPE, particularmente en las subcuencas W80 y W100 donde superan el 10%.

Las mayores diferencias en el cálculo de la PE se tradujeron en desacuerdos significantes entre los hidrogramas del modelo distribuido y agregado. A modo de ejemplo se graficaron en Figura 5.3 los hidrogramas para la subcuenca W80 en la que se obtuvo la mayor DPPE.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

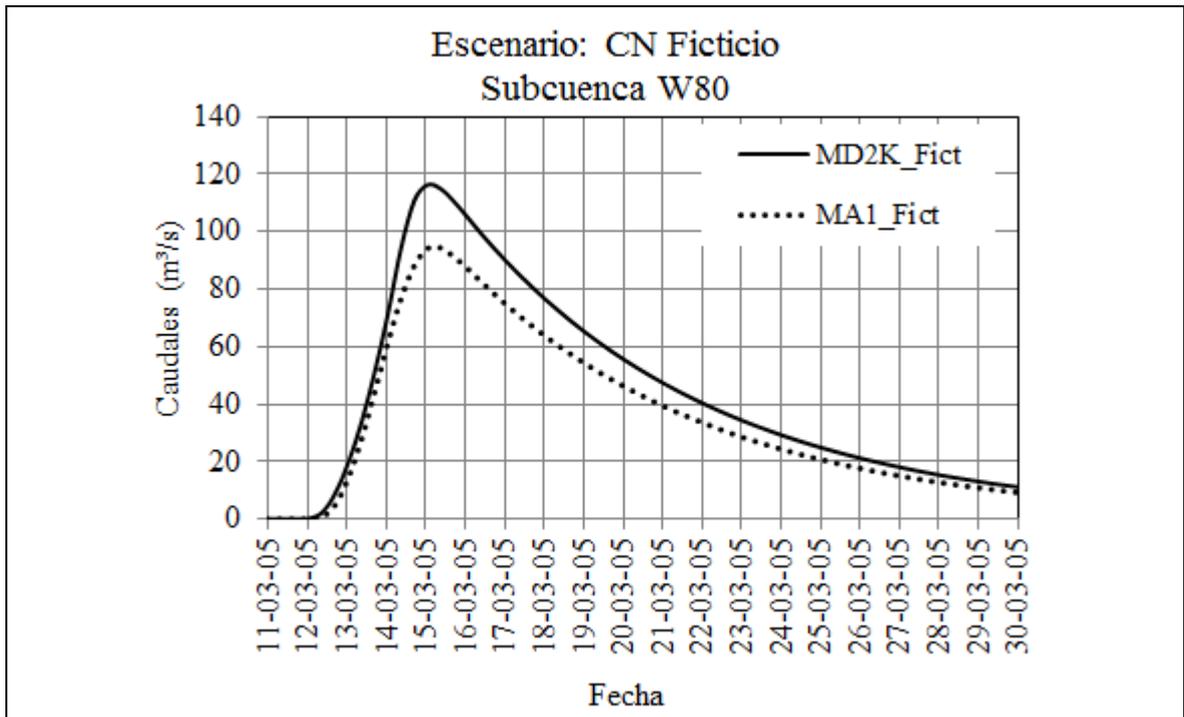


Figura 5.3: Escenario ficticio. Hidrograma del modelo distribuido y del agregado para subcuenca W80

Los coeficientes de variación del CN en la situación ficticia resultaron aproximadamente iguales entre las distintas subcuencas sin embargo las DPPE variaron entre el 1,7% al 17,7%, lo que demostró que éstas no dependen únicamente del CV. Se verificó, en los valores de Tabla 5.3 y gráficamente en Figura 5.4, que existe una cierta correspondencia entre el monto total precipitado (P) y la DPPE, en general a medida que aumenta la P disminuye la DPPE.

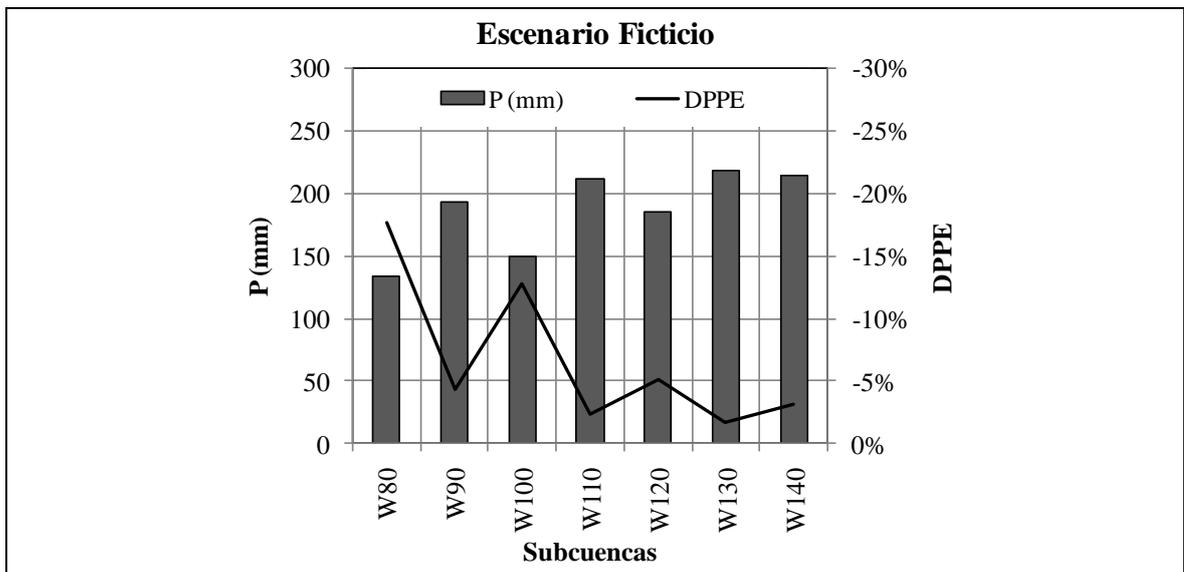


Figura 5.4: Análisis visual de la correspondencia entre P y DPPE

 Capítulo 5: Resultados y Discusión

5.3.3 ANÁLISIS DE LAS MEJORAS DEL MODELO DISTRIBUIDO RESPECTO AL AGREGADO

Se evalúa en esta sección el efecto de las modificaciones introducidas en el método de traslación de la precipitación incluido en ModClark respecto al agregado. Con este propósito se implementó el modelo distribuido denominado **MD2K_Fict_Prom** basado en el MD2K_Fict pero con valores en celda de precipitación y CN uniformes a nivel de subcuenca e iguales a los promedios ponderados ingresados en el modelo agregado **MA1-Fict**.

En Figura 5.5 se contrastaron los hidrogramas para la subcuenca W80 resultantes de las simulaciones con los modelos implementados. Los desacuerdos, debidos únicamente al efecto de la metodología aplicada en la traslación de la PE, resultaron insignificantes.

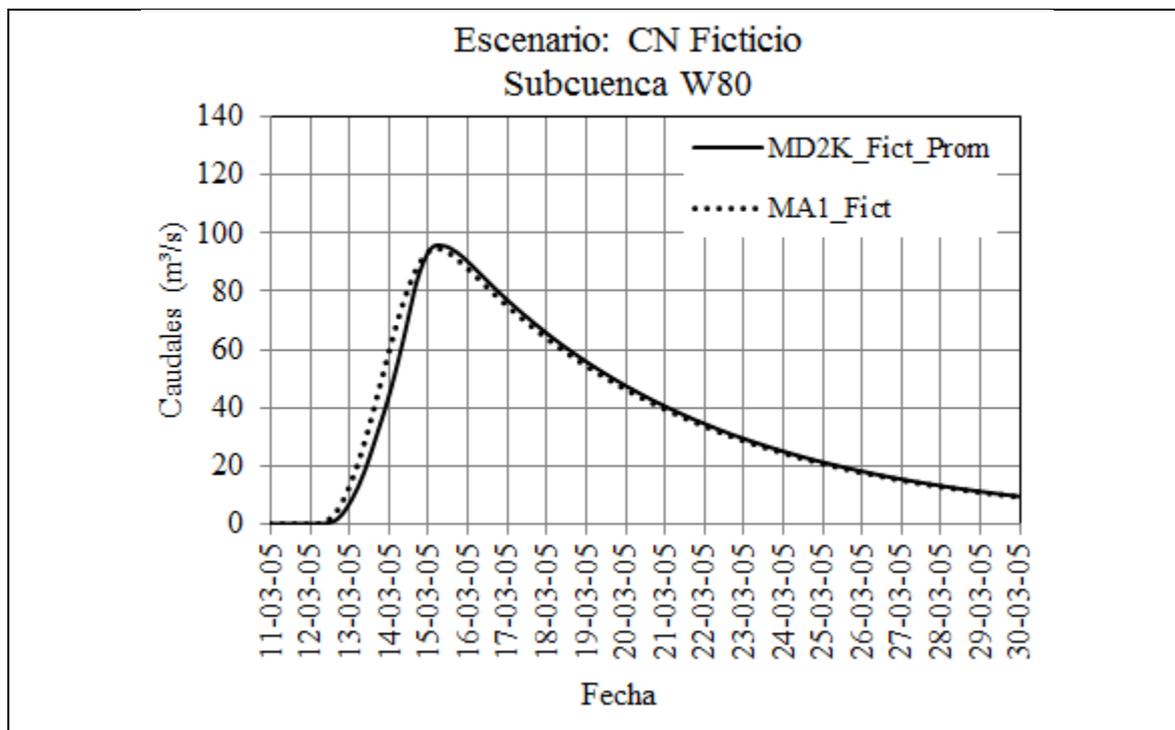


Figura 5.5: Escenario ficticio. Hidrogramas del modelo distribuido con P y CN uniformes versus modelo agregado para subcuenca W80

El desplazamiento exhibido por los hidrogramas en Figura 5.5 se correspondió con las diferencias entre los HTA para la subcuenca W80 de los modelos agregado y distribuido tal como se verificó en Figura 5.6.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

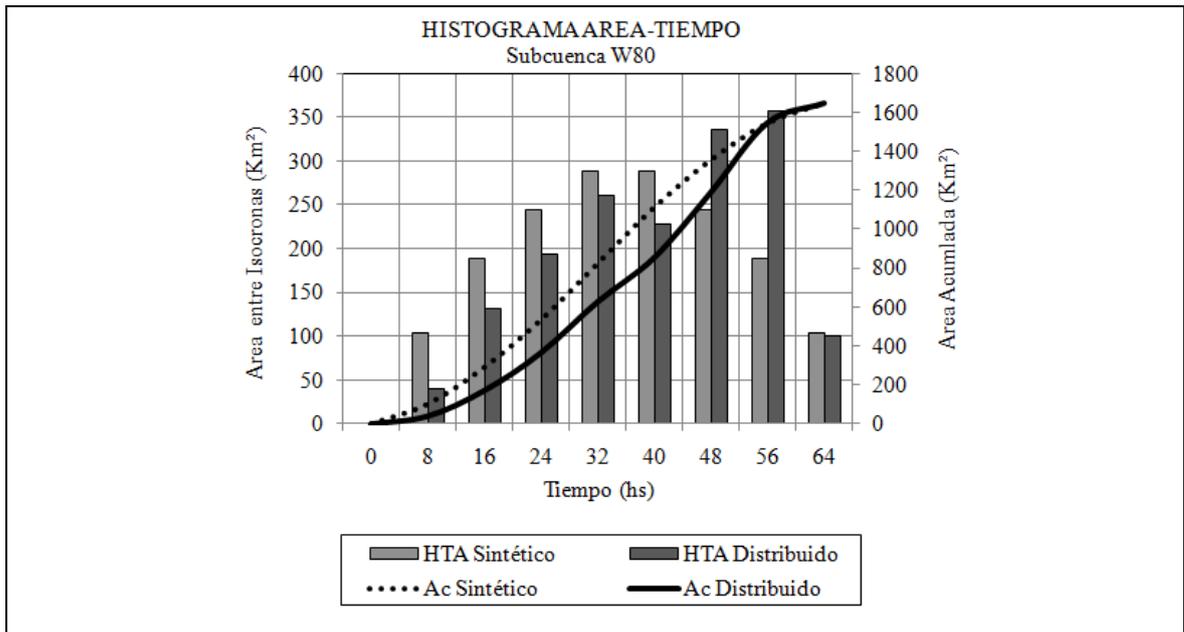


Figura 5.6: HTA aplicado en modelo distribuido y en agregado para la subcuenca W80

En el modelo distribuido el área entre isócronas, requerida para la definición del HTA, se obtuvo a partir del cálculo del tiempo de viaje de cada celda calculado con ecuación (4.15) para las longitudes de recorrido computadas en el SIG (Figura 5.7) en base al MDE. Las áreas para los intervalos iniciales resultaron inferiores a las estimadas con el HTA sintético lo que explica el desplazamiento en el tiempo de la rama ascendente del hidrograma del modelo distribuido respecto al agregado (Figura 5.5).

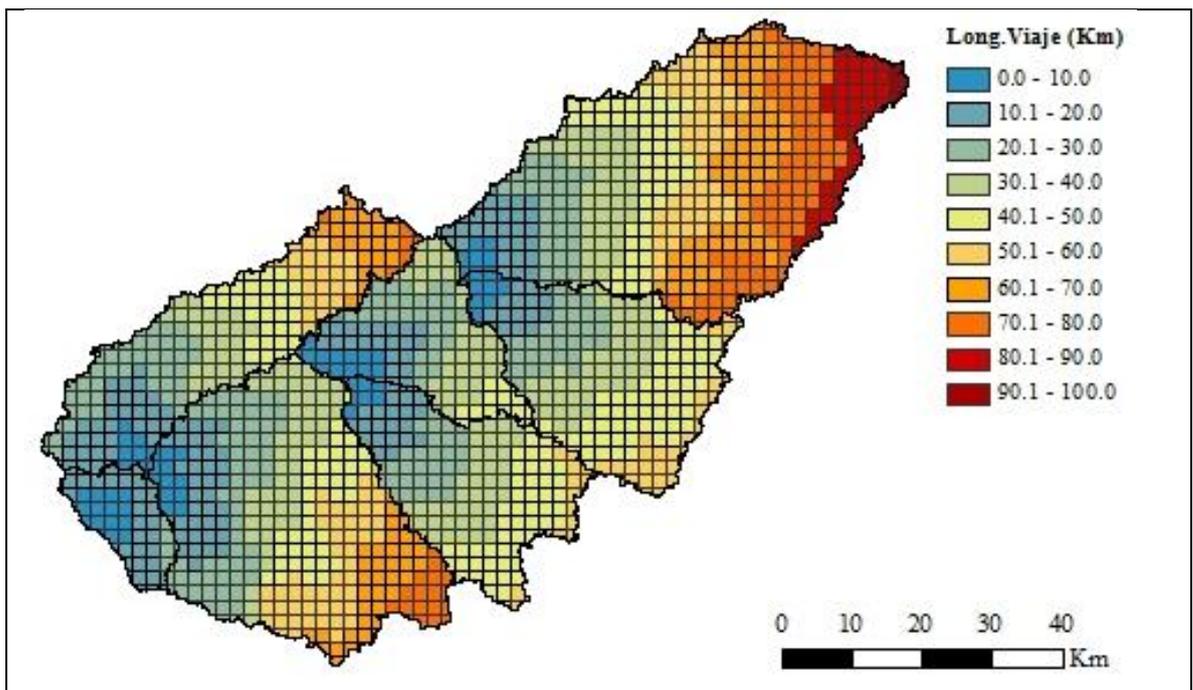


Figura 5.7: Longitudes de viaje de las celdas para el modelo con grilla de 2Kmx2Km

Capítulo 5: Resultados y Discusión

5.4 SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

5.4.1 EFECTO DEL TAMAÑO DE CELDA EN LA PRECISIÓN DE LOS RESULTADOS

La sensibilidad del modelo distribuido a la variación del tamaño de celda se analizó mediante la evaluación de los resultados de las simulaciones para los modelos de cuenca con resoluciones de grilla de 0,5 Km, 1 Km, 2 Km, 5 Km y 10 Km generados en la sección 4.5.2. Los tamaños se seleccionaron de modo de estudiar dos casos con menor tamaño de grilla que el modelo base (2 Km) y dos con mayor dimensión. Los parámetros del modelo ModClark (T_c y R) se mantuvieron, para todos los casos, en los valores ajustados en el modelo base. El escenario simulado fue el de marzo 2005.

La modificación del tamaño de grilla no puede realizarse directamente en HEC-HMS sino que fue necesario en cada caso generar los archivos en plataforma SIG de la manera indicada en la sección 4.6. En dicho desarrollo se observó que el proceso que resulta crítico, en cuanto al tiempo insumido, es la generación de los archivos ASCII requeridos para la creación de los archivos en grilla para HEC-HMS de precipitación y CN. La duración varió desde 37 segundos para la grilla con el tamaño de celda 2 Km a 7 minutos para la de 1 Km y aumenta significativamente a 1 hora con 47 minutos cuando la celda se disminuye a 0,50 Km. Los tiempos mencionados fueron los requeridos para la generación de un solo archivo, el proceso debió repetirse para cada intervalo de precipitación (en total siete) y para la grilla de CN, así, para el modelo de 0,50 Km, el tiempo neto total insumido fue de 14 h:16 minutos.

Los resultados de las simulaciones se compararon, en primer lugar, visualmente en Figura 5.8 donde se graficaron los hidrogramas resultantes para cada tamaño de grilla, las diferencias entre los hidrogramas no fueron significativas sino que prácticamente éstos se superponen. Lo visualizado se corroboró con el cálculo de los coeficientes de bondad de ajuste calculados en Tabla 5.4, resultando errores y coeficientes de Nash muy próximos entre los diferentes modelos.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

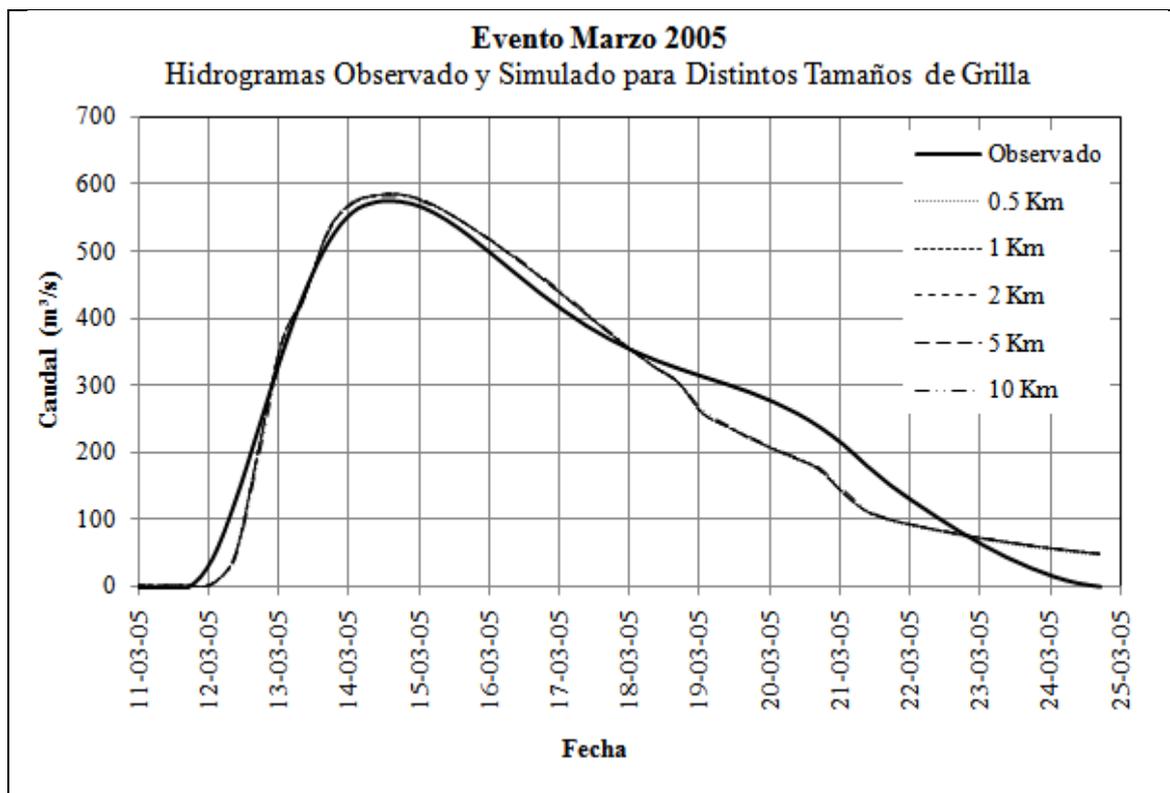


Figura 5.8: Escenario marzo 2005. Hidrogramas observado y simulados para distintos tamaños de grilla

Tabla 5.4: Escenario marzo 2005. Coeficientes de bondad de ajuste para distintos tamaños de grilla

Tamaño celda del modelo	Caudal Pico		Tiempo al Pico		Error en el caudal pico	Error en tiempo al pico	Coef. Nash	Error Estándar
	Observ.	Calculado	Observ.	Calculado	EQp	ETp	NS	Ee
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[h]	[h]	[%]	[%]	[-]	[m ³ /s]
0,5 Km	574,79	586,20	104	104	1,98%	0,00%	0,956	39,13
1 Km	574,79	586,10	104	104	1,97%	0,00%	0,954	39,74
2 Km	574,79	586,10	104	104	1,97%	0,00%	0,954	39,74
5 Km	574,79	584,90	104	104	1,76%	0,00%	0,955	39,36
10 Km	574,79	581,60	104	104	1,18%	0,00%	0,955	39,48

5.4.2 EFECTO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL CN

Con el propósito de analizar la influencia del grado de heterogeneidad del CN sobre la sensibilidad del modelo a la discretización espacial se implementaron los modelos con diferentes tamaños de grilla para el escenario ficticio.

 Capítulo 5: Resultados y Discusión

El mapa de CN ficticio (Figura 4.33) fue la información base a partir de la cual se asignaron los valores de CN a cada celda de los modelos de 0,5 Km, 1 Km, 5 Km y 10 Km.

En Tabla 5.5 se sintetizaron los valores de PE calculados en las simulaciones y se computaron las DPPE con la expresión (4.45) donde el modelo “j” de referencia, en este caso, fue el **MD2K_Fict**. Las DPPE se incrementaron a medida que se aumentó el tamaño de grilla respecto a la resolución del mapa de CN mientras que al disminuirlo prácticamente no se registraron desacuerdos.

Tabla 5.5: Escenario ficticio. DPPE para los modelos de distintos tamaños de grilla

Subcca.	MD2K_Fict	MD0,5K_Fict		MD1K_Fict		MD5K_Fict		MD10K_Fict	
	PE _{2K}	PE _{0,5K}	DPPE	PE _{1K}	DPPE	PE _{5K}	DPPE	PE _{10K}	DPPE
	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
W80	48,1	48,1	-0,1%	48,1	0,0%	41,6	-13,5%	40,7	-15,4%
W90	89,3	89,3	0,0%	89,3	0,0%	88,5	-0,9%	83,4	-6,5%
W100	54,9	54,9	0,0%	54,8	0,0%	48,2	-12,1%	49,6	-9,5%
W110	92,0	91,8	-0,2%	91,9	0,0%	90,9	-1,1%	93,7	1,9%
W120	87,9	87,9	0,0%	87,9	0,0%	83,9	-4,6%	83,6	-5,0%
W130	101,5	101,4	0,0%	101,5	0,0%	99,0	-2,4%	97,7	-3,7%
W140	86,0	85,9	-0,1%	86,0	0,1%	85,2	-0,9%	82,6	-4,0%

La constancia de los valores de PE al disminuir el tamaño de grilla y la variación al incrementarlo encuentra explicación en la resolución del mapa base y en el proceso de asignación de los datos a las celdas. El mapa raster de CN ficticio fue creado con un tamaño de pixel de 2Kmx2Km, al disminuir el tamaño de celda a un submúltiplo (0,5 Km y 1 Km) el valor de CN atribuido a una celda es el mismo del pixel que la contiene mientras que al aumentar la escala de la grilla (5 Km y 10 Km) el valor de CN para el nuevo tamaño de celda es obtenido como promedio ponderado de los pixeles vecinos contenidos perdiendo detalle en la información. Lo expresado se grafica en Figura 5.9, cada cuadro de color representa un pixel del mapa base de CN y la grilla superpuesta es la adoptada para la discretización de la cuenca en cada modelo analizado.

 Capítulo 5: Resultados y Discusión

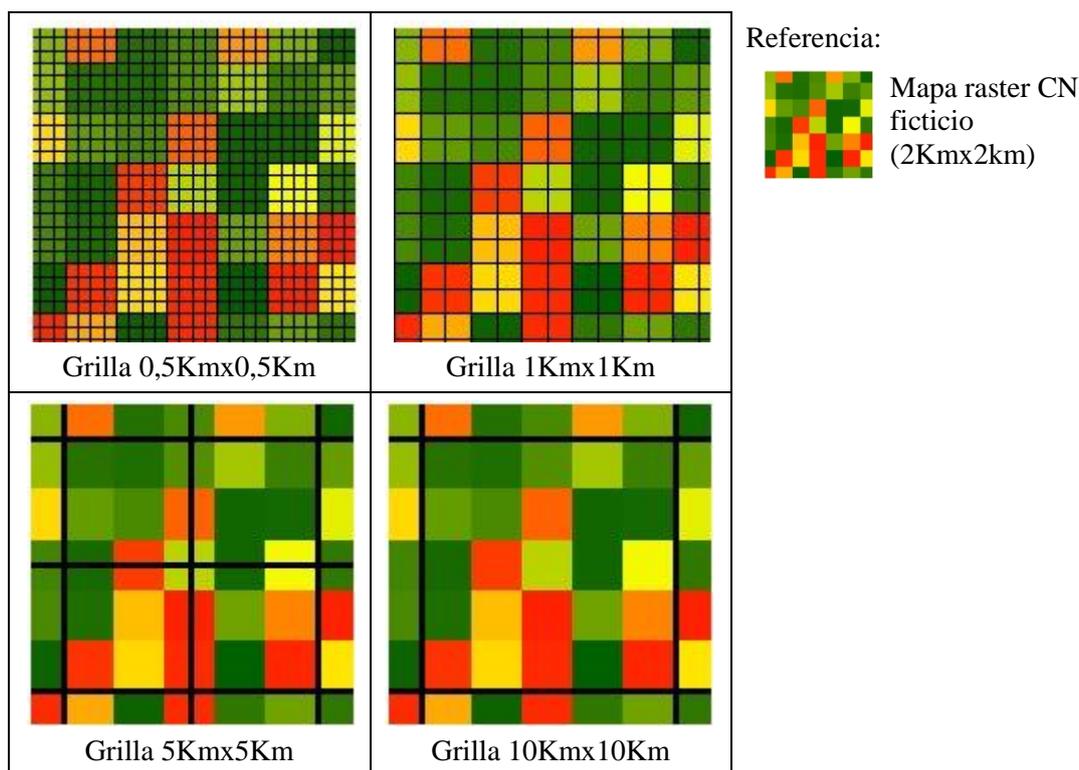


Figura 5.9: Análisis del procedimiento para la asignación de valores CN cuando se modifican los tamaños de celda

Las diferencias en los resultados de los modelos cuando se varía el tamaño de celda se visualizaron también en los hidrogramas. En Figura 5.10 se contrastaron, para la subcuenca W80 de mayor sensibilidad a la discretización espacial, los hidrogramas para los diferentes tamaños de celda con el del modelo de referencia MD2K_Fict. Para los tamaños de celda inferiores al valor de resolución espacial del mapa de CN, los hidrogramas se superpusieron mientras que para tamaños superiores se produjeron desacuerdos.

Capítulo 5: Resultados y Discusión

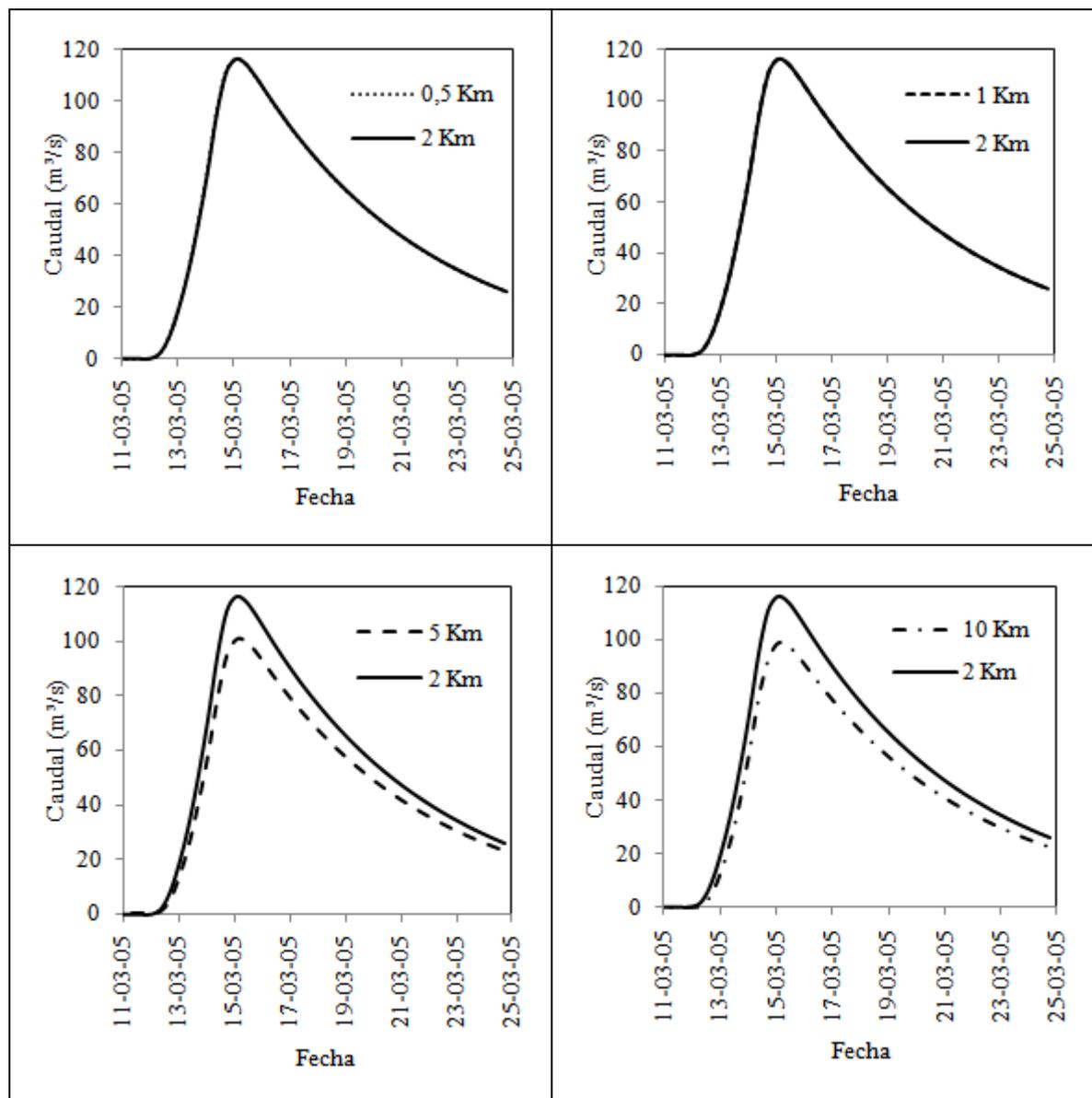


Figura 5.10: Escenario ficticio. Hidrogramas de los modelos con distintos tamaños de celda para la subcuenca W80

Capítulo 6: Conclusiones

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

6.1 CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

Los objetivos generales planteados para esta tesis fueron analizar el desempeño de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca de gran tamaño y evaluar el efecto de la discretización espacial sobre los resultados. En particular el estudio se realizó para el modelo distribuido ModClark de HEC-HMS aplicado a la cuenca del Arroyo Feliciano de 5.500 Km² de área de aporte.

Para alcanzar los objetivos planteados, una etapa importante del estudio fue la generación de la información espacialmente distribuida de datos de precipitación y valores de CN aplicando técnicas avanzadas de interpolación espacial y teledetección. En la sección 6.2 se realiza una apreciación sobre la eficiencia de dichas herramientas para la modelación hidrológica.

En la sección 6.3 se desarrollan las conclusiones sobre la performance del modelo distribuido ModClark basadas en la comparación con el modelo agregado del HU de Clark que tiene la particularidad de presentar igual parametrización que el distribuido y estar disponible en el mismo sistema de modelación HEC-HMS.

En la sección 6.4 se presentan las conclusiones referidas a la sensibilidad del modelo distribuido a la discretización espacial derivadas del análisis de los resultados de las simulaciones para diferentes tamaños de grilla.

Otro propósito de este estudio fue analizar los inconvenientes en la implementación del modelo distribuido que podrían ser la causa de su pobre aplicación en la práctica actual. En la sección 6.5 se exponen las dificultades detectadas y se desarrollan las soluciones.

6.2 GENERACIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIALIZADA

El tratamiento de la información de precipitación y su distribución espacial conjuntamente con la generación de mapas distribuidos de CN implicaron un esfuerzo significativo y un apreciable tiempo insumido que se juzgaron necesarios para asegurar la calidad de la información que se genera y la mejor representación de la realidad que se simula mediante la aplicación de procedimientos avanzados en el tratamiento espacial de los datos. Las principales ventajas de las técnicas utilizadas en la producción de mapas de CN y de precipitación se comentan en las secciones 6.2.1 y 6.2.2 respectivamente.

Capítulo 6: Conclusiones

6.2.1 MAPAS DE NÚMERO DE CURVA

La aplicación del procedimiento de clasificación supervisada de imágenes satelitales para definir los usos de suelo en los distintos puntos del espacio de la cuenca del Arroyo Feliciano permitió detectar modificaciones de los mismos entre las fechas de calibración (2005) y validación (2010) que se tradujo en un incremento en los valores de CN del último escenario. Esto es una ventaja importante de la teledetección que brinda la posibilidad de contar con información actualizada para analizar la ocupación de las tierras y obtener mayor precisión en el cálculo del CN para una fecha en particular, acentuado este beneficio por la posibilidad de contar con dicha información de manera gratuita y en formato digital.

Las diferencias en la variabilidad espacial del CN, evidenciadas a partir del tratamiento de las imágenes, pasarían desapercibidas si se utilizaran valores agregados de CN definidos de la manera clásica mediante una apreciación global y cualitativa de una imagen.

6.2.2 MAPAS DE PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA

La aplicación de técnicas geoestadísticas, para la representación espacial de las tormentas simuladas, permitió analizar la correlación espacial entre los datos pluviométricos en la cuenca del Arroyo Feliciano y seleccionar la función estadística que mejor representó el fenómeno. Esto es una ventaja frente a otros procedimientos tradicionales de interpolación en cuanto que los pesos de ponderación de cada sitio con medición no son arbitrarios sino que dependen de la variabilidad espacial observada.

El procedimiento aplicado posibilitó además analizar la fiabilidad de los mapas producidos mediante validación cruzada lo cual, mediante un proceso interactivo, permitió seleccionar el modelo teórico con el menor error de predicción.

La herramienta utilizada para el análisis geoestadístico se encuentra incorporada a la misma plataforma SIG de procesamiento de la cuenca con HEC-GeoHMS, lo que significó una ventaja al momento de generar los archivos a partir de la información cartográfica resultante para el modelo hidrológico distribuido.

Los mapas de precipitación distribuida fueron también utilizados para el cálculo de la PMA en cada subcuenca para la elaboración de los hietogramas ingresados al modelo agregado. Los resultados de la modelación agregada con los datos de lluvia ingresados de

Capítulo 6: Conclusiones

esta manera fueron más precisos que cuando se realizó la simulación aplicando los hietogramas resultantes de la metodología de Thiessen.

6.3 DESEMPEÑO DEL MODELO DISTRIBUIDO MODCLARK

En el estudio se implementaron dos escenarios para los modelos distribuido y agregado. El primero simuló un evento real con el objeto de comparar la precisión de los modelos en relación al hidrograma observado y el segundo representó una situación ficticia con mayor heterogeneidad en los valores de CN con el propósito de analizar la influencia de la variabilidad del CN sobre las diferencias en los resultados de los modelos.

En el escenario real, de baja heterogeneidad en los valores de CN, las diferencias detectadas entre los resultados de los modelos distribuido y agregado fueron insignificantes. La precisión de los resultados fue muy buena para ambos, los valores de los estadísticos evaluados en el análisis de la bondad de ajuste resultaron similares, el coeficiente de eficiencia de Nash alcanzó un valor de 0,95, el tiempo al pico coincidió con el observado y el error en la estimación del caudal pico fue del 2% en el distribuido y 4% en el agregado. En particular para el método agregado, el ajuste mencionado se obtuvo cuando la precipitación media areal se calculó a partir de los mapas de precipitación distribuida, cuando se utilizó el método de polígonos de Thiessen disminuyó el coeficiente de eficiencia y se incrementó el error del caudal y tiempo al pico.

En el escenario ficticio se incrementaron las diferencias entre los resultados de los modelos respecto a lo evidenciado en el real. Las mayores discrepancias se detectaron en el cálculo de la precipitación efectiva mientras que las modificaciones introducidas en ModClark para la transformación en hidrograma de escurrimiento directo, tuvieron escasa significancia.

En el cálculo de la precipitación en exceso el método agregado utiliza el procedimiento del CN ponderado mientras que el distribuido aplica el de la escorrentía ponderada. En el último se computan los valores de precipitación efectiva para cada celda, luego son trasladados, sumados y expresados como una descarga promedio en cada intervalo de tiempo (HEC, 1995). En USDA-NRSC (2004b) se indica que las diferencias entre ambos métodos son mayores en cuencas con valores de CN muy diferentes en su extensión y bajos montos precipitados. Lo expresado por USDA-NRSC coincide con lo analizado en los resultados de esta tesis, las diferencias en la precipitación en exceso entre

Capítulo 6: Conclusiones

ambos modelos, se incrementaron en el escenario ficticio de mayor heterogeneidad en CN y fueron superiores en las subcuencas con menor monto precipitado.

En la aplicación del método de ModClark, para la transformación de la precipitación en exceso en hidrograma de escurrimiento directo, el traslado de la precipitación se realiza en función del tiempo de viaje de cada celda mientras que en el modelo agregado se aplica un HTA Sintético definido por el HEC. En este trabajo se verificó que estas modificaciones tienen una baja incidencia en los resultados del modelo para la cuenca analizada cuando se los compara con los del agregado.

En el método de ModClark el cálculo del tiempo de viaje de cada celda se realiza bajo el supuesto simplificador que la velocidad es constante en toda la extensión de la cuenca. En la investigación de Bhattacharya et al. (2012) se presentó una mejora para ModClark mediante el desarrollo de una fórmula para estimar la velocidad del escurrimiento para cada celda en función de la pendiente y del área de drenaje acumulada con la cuál es posible crear un campo de velocidades espacialmente distribuidas. Optimizaciones de este tipo aún no han sido introducidas en HEC-GeoHMS pero de concretarse en un futuro es de esperar una mayor precisión en el cálculo del tiempo de traslado del escurrimiento de cada celda y con ello en el HTA.

De lo analizado en esta sección se infiere que para eventos y cuencas de características similares a la estudiada, con baja heterogeneidad en los valores de CN, los resultados del modelo distribuido son tan precisos como los del modelo agregado. En una situación de mayor heterogeneidad en los valores de CN se observaron diferencias entre los resultados de ambos modelos. En este sentido sería de interés para investigaciones futuras profundizar los estudios para una cuenca aforada con características de heterogeneidad espacial en los tipos y usos de suelos y en los montos precipitados.

6.4 SENSIBILIDAD DEL MODELO DISTRIBUIDO A LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

El modelo distribuido se implementó para tamaños de celda mayores y menores a los de la grilla base (2Kmx2Km) para el cual se calibró, en total se definieron cinco casos con tamaños de celda que variaron de 500 m a 10 Km. En cada uno de los casos se simuló dos escenarios, el real y el ficticio.

Capítulo 6: Conclusiones

Los tiempos para generar los archivos en grilla de CN y precipitación en formato de HEC-HMS a partir de los mapas distribuidos, se incrementaron notablemente a medida que se disminuyó el tamaño de celda. Para el caso de la discretización en celdas de 500 m se insumió un tiempo neto total de 14 horas mientras que para el tamaño de 2 Km solo 4 minutos y menor aún para las dimensiones mayores. Estos resultados reflejaron la importancia de analizar la sensibilidad del modelo al tamaño de celda para seleccionar el más eficiente que sería aquel para el cual se logran resultados precisos con tiempos de procesamiento adecuados.

En el escenario real, la precisión del modelo distribuido al modificar el tamaño de celda prácticamente permaneció constante con valores de los parámetros de bondad de ajuste del orden de los obtenidos en la calibración. Los hidrogramas resultantes de los distintos casos se superpusieron.

En el escenario ficticio, los resultados de los modelos difirieron respecto al de calibración cuando se incrementó el tamaño de celda por encima del valor de resolución espacial del mapa de CN ficticio y permanecieron invariables cuando se lo disminuyó a valores submúltiplos de aquel.

Del análisis realizado se concluyó que al momento de seleccionar el tamaño de celda se deben evaluar dos aspectos, la resolución de los mapas de precipitación y CN y la variabilidad espacial de los mismos. En un escenario de valores homogéneos o de muy baja heterogeneidad las dimensiones de la grilla tienen baja a nula influencia en los resultados del modelo mientras que en una situación de mayor heterogeneidad sería adecuado que el tamaño de celda fuera coincidente con la resolución espacial de los mapas. Si éste último resultara demasiado pequeño implicando tiempos excesivos de procesamiento debería analizarse el tamaño del área mínima dentro de la cual los valores de CN o de precipitaciones se mantienen uniformes, el tamaño de la celda podría seleccionarse en torno a éste.

6.5 DIFICULTADES EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DISTRIBUIDO

El mayor esfuerzo para la implementación del modelo distribuido se correspondió con las tareas en ArcGIS para el procesamiento de la información y la generación de los archivos en grilla. Obtenidos los archivos para HEC-HMS, la corrida del modelo hidrológico fue sencilla y relativamente rápida para cualquier discretización espacial de la cuenca.

Capítulo 6: Conclusiones

La mayor dificultad en la etapa de procesamiento de la información fue la obtención de los archivos en grilla de CN y de precipitaciones en formato de HEC-HMS a partir de los mapas raster correspondientes. La técnica para su ejecución no está explicitada en el manual de HEC-GeoHMS (Fleming and Doan, 2010), posiblemente porque el modelo ha sido desarrollado para el formato de datos disponibles en Estados Unidos. En este estudio se ha desarrollado un procedimiento para la generación de los archivos en grilla y se ha detallado en el ANEXO 7 con el propósito de facilitar la aplicación del modelo ModClark a futuros usuarios.

REFERENCIAS

- Abbaiah, G. and Krishna Murthy, B. R. (2007). Geostatistical Analysis for Estimation of Mean Rainfalls in Andhra Pradesh, India. *International Journal of Geology*, 1, pp.35-51.
- Arbuet Moraes, M.A. (2009). *Efectos Hidrológicos del Cambio de Uso del Suelo en el Litoral Argentino. Estudio de Caso: cuenca del Arroyo Feliciano. Provincia de Entre Ríos*. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Arumi, J.L., De La Fuente, C., Gutiérrez López, A. y Vargas, J. (2009). Análisis geoestadístico para describir la distribución espacial de la precipitación de una cuenca patagónica. *Revista Aqua-LAC*, 1(1), pp 29-41.
- Bhattacharya, A. K., McEnroe, B. M., Zhao, H., Kumar, D. and Shinde, S. (2012). ModClark Model: Improvement and Application. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 2(7), pp. 100-118.
- Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979). A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), pp. 43-69.
- Boschetti, N., Díaz, E. y Duarte, O. (2009). Vulnerabilidad del agua subterránea en la cuenca del Arroyo Feliciano. Entre Ríos. Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (4), pp. 533-542.
- Brizuela, A., Muñoz, J.D., Romero, C. y Milera, S. (2003). *Bosques Nativos y Selvas Ribereñas en la Provincia de Entre Ríos*. Entre Ríos, Argentina: Facultad de Ciencias Agropecuarias de la UNER.
- Chow, V. T., Maidment, R. D. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 2da. Edición, Madrid, España: RIALP.
- CEIWR-HEC. (1996). *ModClark Model Development for the Muskingum River Basin, OH*. (Report PR-33). Davis. CA: US Army Corps of Engineers.
- CEIWR-HEC. (2009). *HEC-DSSVue. HEC Data Storage System Visual Utility Engine. User's Manual*. (Report CPD-79). Davis. CA: US Army Corps of Engineers.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7, pp. 205-230.

 Referencias

- Eastman, J.R. (2009). *IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Worcester, MA: Universidad Clark.
- Emery, X., (2007). *Apunte de Geoestadística*. Ingeniería de Minas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Recuperado de http://downloads2.esri.com/support/documentation/ao/Using_ArcGIS_Geostatistical_Analyst.pdf
- Feldman, A.D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. (Report CPD-74). Davis. CA: US Army Corps of Engineers.
- Fleming, M.J. and Doan, J.H. (2010). *Geospatial Hydrologic Modeling Extension HEC-GeoHMS. User's Manual Version 5*. (Report CPD-77). Davis. CA: US Army Corps of Engineers.
- Ghavidelfar, S., Alvankar, S. R. and Razmkhah, A. (2011). Comparison of the Lumped and Quasi-distributed Clark Runoff Models in Simulating Flood Hydrographs on a Semi-arid Watershed. *Water Resources Management*, 25(6), pp. 1775-1790.
- Graf, J.B., Garklavs, G. and Oberg, K.A. (1982a). *Time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams*. (Report USGS-WRI 82-13). Illinois: U.S. Geological Survey.
- Graf, J., Garklavs, G. and Oberg, K.A. (1982b). *A technique for estimating time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams*. (Report USGS-WRI 82-22). Illinois: U.S. Geological Survey.
- Gómez, H., González, H., Guerra, F. y Zambrano, Z. (2006). Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG. *Revista Geoenseñanza*, (11), pp. 97-106.
- Guerra Cobián, V.H. (2007). *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU*. Tesis de doctorado en Ingeniería con Énfasis en Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Hämmerly, R., Paris, M. y Paoli, C. (2012). *Análisis de la estructura espacial de una tormenta con métodos geoestadísticos*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica.
- HEC (1990). *HEC-1 flood hydrograph package. User's manual*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

 Referencias

- HEC (1995). *ModClark. Modified Clark Runoff Simulation. User's manual*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.
- Inácio Rodrigues, T., Moreira Rocha, A. e Perez Philo, A. (2007). *Mapeamento de uso e ocupação das terras na Bacia do Baixo Curso do Rio São José do Dourados-SP por sistemas de informações geográficas e imagem de satélite*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil.
- Johnson, B., Julien, M., Rojas, R. and Velleux, M. (2008). Grid Scale Effects on Watershed Soil Erosion Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13 (9), pp. 793-802.
- Lu, F. X. (2009). *Simulation of the Upper Waimakariri River Catchment by Observed Rain & Radar Reflectivity*. Dissertation for the Master of Applied Science, Lincoln University, USA.
- McCarthy, G.T. (1939). *The unit hydrograph and the flood routing*. Providence, Rhode Island: U.S. Corps of Engineers.
- Méndez Venegas, J. (2008). *Modelación de la distribución espacial de la precipitación en el valle de la ciudad de México usando técnicas geoestadísticas*. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Texcoco, Estado de México.
- Morin, G. et Paquet, P. (1995). Le Modèle de Simulation de Quantité et de Qualité CEQUEau, Guide de l'utilisateur. Vers. 2.0 pour Windows. *INRS-Eau, rapport de recherché*, 435, 54 p.
- Morín, J., Lenzi, L., Zucarelli, V., Paoli, C., Ceirano, E. y Fabiano, L. (1989). *Aplicación del modelo OCINE en la cuenca del Arroyo Feliciano*. Santa Fe, Argentina: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas-UNL.
- Nordstrom, E. (2009). *Distributed Modeling Using HEC-HMS: A Continuum of Water Droplets*. Thesis Master of Science in Civil Engineering, Texas Tech University, USA.
- Paoli, C.U., Bolzicco, J.E.A. y Cacik, P. (1996). *Análisis de Frecuencia de Variables Hidrológicas*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Paudel, M., Nelson, E.J. and Scharffenberg, W. (2009). Comparison of Lumped and Quasi-Distributed Clark Runoff Models Using the SCS Curve Number Equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14 (10), pp.1098–1106

 Referencias

- Peters, J. C. and Easton, D. J. (1996). Runoff Simulation Using Radar Rainfall Data. *Water Resources Bulletin*, 32 (4), pp.753–760.
- Riccardi, G.A. (2000). A cell model for hydrological-hydraulic modeling. *Journal of Environmental Hydrology. The Electronic Journal of the International Association of Environmental Hydrology*, Vol. 8, Paper 15, 13 p.
- Romero, E.C. (2013). *Gestión integrada de los recursos hídricos y bosques nativos de la cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina*. Tesis de Doctorado, Instituto Universitario de Xeoloxia, Universidad de Coruña, España.
- Sabattini, R.A., Ledesma, S., Brizuela, A., Sabattini, J.A., Fontana, E., Diez, J.M., Sabattini, I.A., Kock Pomerantz, A. y Heinze, D. (2009a). *Informe 2. Zonificación de los bosques nativos en el Departamento Federal (Entre Ríos) según las categorías de conservación*. Recuperado de <http://www.fca.uner.edu.ar/novedades/>
- Sabattini, R.A., Ledesma, S., Brizuela, A., Sabattini, J.A., Fontana, E., Diez, J.M., Sabattini, I.A., Kock Pomerantz, A. y Heinze, D. (2009b). *Informe 3. Zonificación de los bosques nativos en el Departamento Feliciano (Entre Ríos) según las categorías de conservación*. Recuperado de <http://www.fca.uner.edu.ar/novedades/>
- Sabattini, R.A., Ledesma, S., Brizuela, A., Sabattini, J.A., Fontana, E., Diez, J.M., Sabattini, I.A., Kock Pomerantz, A. y Heinze, D. (2009c). *Informe 1. Zonificación de los bosques nativos en el Departamento La Paz (Entre Ríos) según las categorías de conservación*. Recuperado de <http://www.fca.uner.edu.ar/novedades/>
- SAGyP e INTA. Proyecto PNUD ARG/85/019. (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala gráfica 1:500.000. Versión digital corregida, revisada y aumentada (Versión 9.0)*. Recuperado de <http://geointa.inta.gov.ar/suelos>
- Santos, S., Monteiro, A., Mourato, S. e Fernández, P. (2006). *Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelação hidrológica*. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Granada, España.
- Saz Sánchez, M.A. y Serrano, S.M.V. (2002). Cartografía de Precipitaciones y Temperaturas en el Valle Medio del Ebro Mediante Utilización de Diferentes Técnicas Estadísticas. *Revista Geographicalia*, 42, pp.73-92.
- SAyDS (2002). Mapa Forestal de la Provincia de Entre Ríos. *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Año 1998-2001*. Recuperado de http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/bosques/umsef/cartografia/mapa_entrerios.pdf
- SAyDS (2007a). Informe Regional Espinal. *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Segunda Etapa. Inventario de Campo de la Región El Espinal. Distritos*

Referencias

- Calden y Ñandubay*. Argentina: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- SAyDS (2007b). Manual de Teledetección Segunda Etapa. *Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos Segunda Etapa. Inventario de Campo de la Región El Espinal. Distritos Calden y Ñandubay*. Argentina: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Shrestha, R., Tachikawa, Y. and Takara, K. (2007). Selection of scale for distributed hydrological modelling in ungauged basins, Predictions in Ungauged Basins (PUB) Kick-off meeting. *IAHS Publication*, 309, pp.290-297.
- Soil Survey Staff (1975). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. USDA Handbook 436. Washington, D.C., USA: Gov. Printing Office.
- Stenta, H., Riccardi, G. y Basile, P. (2008). Influencia del grado de discretización espacial en la respuesta hidrológica de una cuenca de llanura mediante modelación matemática distribuida. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, XXIII (3), pp. 123-138.
- Straub, T.D., Melching, C.S. and Kocher, K.E. (2000). *Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois*. (Report USGS/WRI 00-4184). Illinois: U.S. Geological Survey.
- Takasao, T., Shiiba, M. and Ichikawa, Y. (1996). A runoff simulation with structural hydrological modeling system. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE*, 14 (2), pp. 47-55.
- Tasi, H.A.A. (2009). *Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales Cultivos Agrícolas*. Tesis de Doctorado, Instituto Universitario de Xeoloxia, Universidad de Coruña, España.
- USDA-NRCS (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: TR-55*. Second edition. 210-vi-TR-55. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- USDA-NRCS (2004a). Hydrologic Soil-Cover Complexes. Chapter 9. *Part 630, Hydrology National Engineering Handbook*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Referencias

- USDA-NRCS (2004b). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Chapter 10. *Part 630, Hydrology National Engineering Handbook*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- USDA-NRCS (2009). Hydrologic Soil Groups. Chapter 7. *Part 630, Hydrology National Engineering Handbook*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Visentín, F. (2010). *Metodología para el manejo de cuencas hidrográficas, con criterios de sustentabilidad, en la cuenca del A° Feliciano*. Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Wolock, D.M. and Price, C.V. (1994). Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based hydrologic model. *Water Resources Research*, 30, pp. 3041-3052.
- Woolhiser, D. A., Smith, R.E. and 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.
- Zamanillo, E.A., Larenze, G., Tito, M.J., Pérez, M.M. y Garat, M.E. (2008). *Procedimientos para la estimación de tormentas de diseño para la Provincia de Entre Ríos*. 1era. Edición. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Zucarelli, G. V., Morresi, M.V. y Hammerly, R. (2002). Evaluación Preliminar de la Red Pluviométrica en la Cuenca del Arroyo Feliciano, Entre Ríos, Argentina. *Revista del CURIHAM*, 8 (1), pp.167-177.
- Zucarelli, G.V., Ceirano, E. y Barrera, D. (2005). *Determinación de caudales con precipitaciones obtenidas a partir de sensoramiento remoto en el Arroyo Feliciano, Entre Ríos*. V Seminario Internacional CYTED XVII.

NOTACIONES

AMC	Condición de Humedad Antecedente
ASE	Error Estándar Promedio
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CN	Número de Curva
DPPE	Diferencia Porcentual en la Precipitación en Exceso
DSS	Data Storage System
ED	Escurrimiento Directo
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HEC-GeoHMS	Extensión geográfica para HEC-HMS
HED	Hidrograma de Escurrimiento Directo
HTA	Histograma Área-Tiempo
IDW	Ponderación de Distancia Inversa
MA	Modelo Agregado
MD	Modelo Distribuido
MDE	Modelo Digital de Elevación
ME	Error Medio
ModClark	Versión modificada del método de Clark
MSE	Error Estandarizado Medio
NRSC	Servicio de Conservación de los Recursos Naturales
NS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
P	Precipitación total
PE	Precipitación en Exceso
PMA	Precipitación Media Areal
R	Coefficiente de almacenamiento

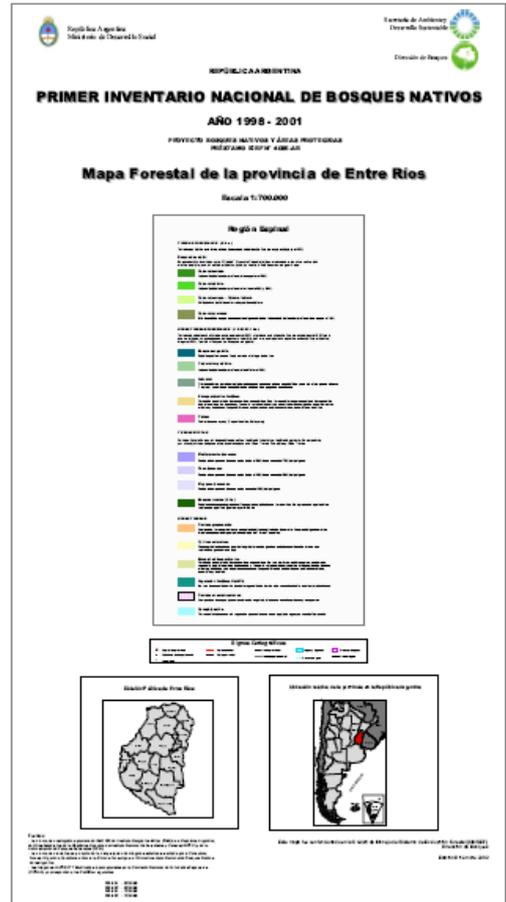
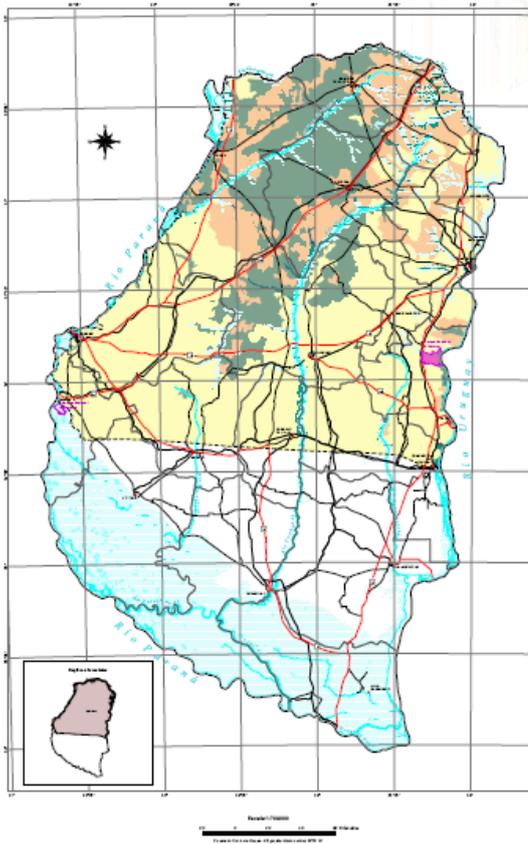
Notaciones

RMS	Raíz del Error Cuadrático Medio
RMSSE	Raíz del Error Estandarizado Cuadrático Medio
SCS	Servicio de Conservación de Suelos
SIG	Sistema de Información Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSRH	Subsecretaría de Recursos Hídricos
T _c	Tiempo de concentración

ANEXOS

ANEXO 1: Mapa forestal de la Provincia de Entre Ríos

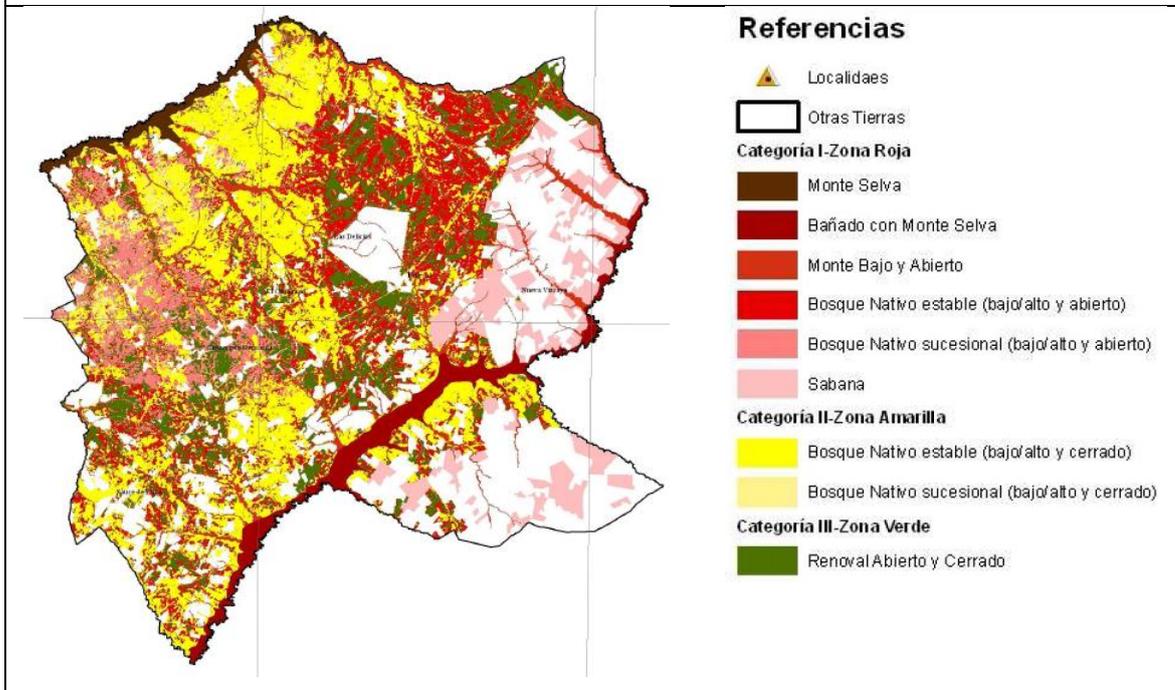
Fuente: S AyDS (2002)



ANEXO 3: Mapas departamentales. Clasificación de los montes nativos

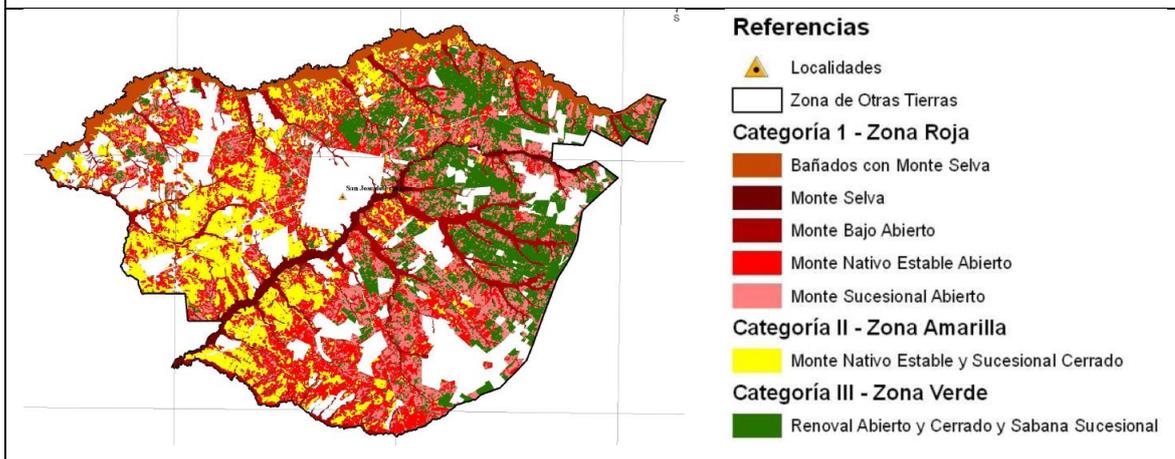
Departamento Federal

Fuente: Sabbatini R.et al. (2009a)



Departamento Feliciano

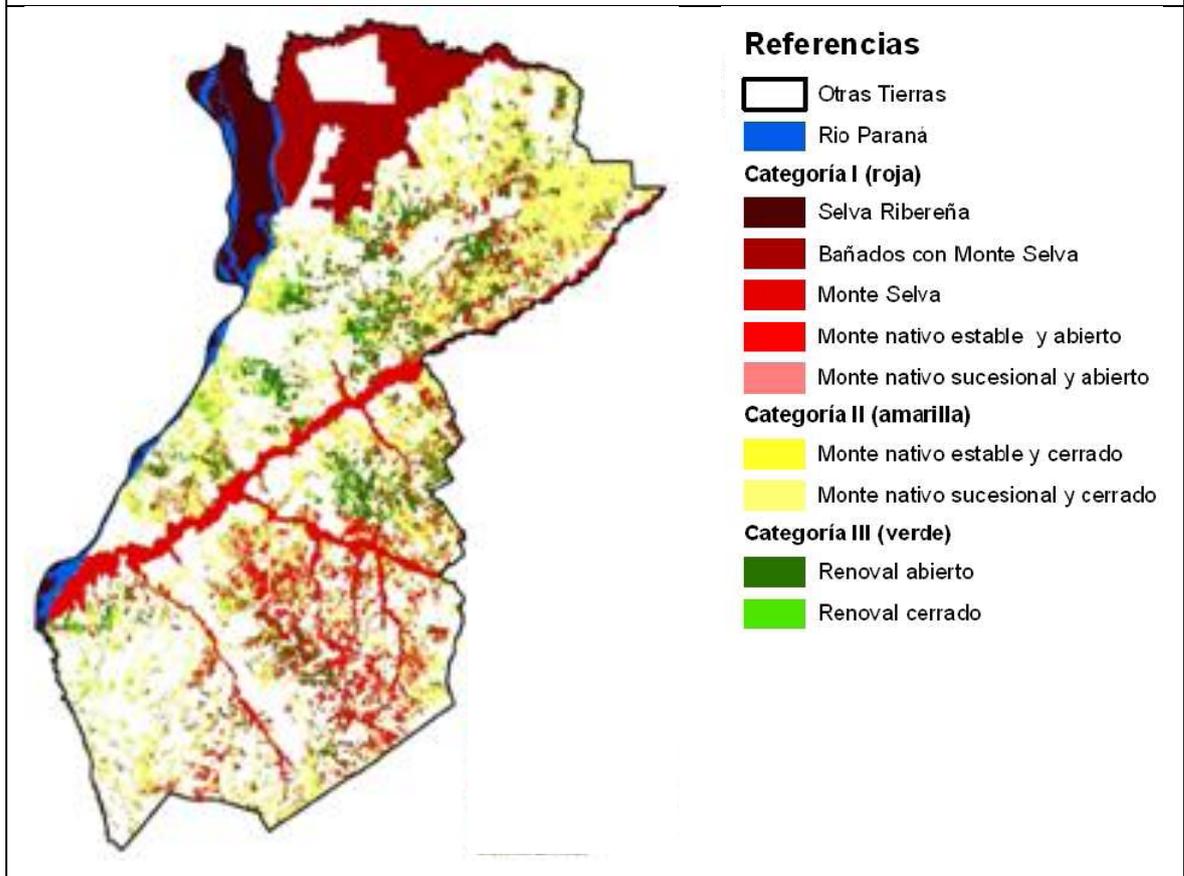
Fuente: Sabbatini R.et al. (2009b)



Anexos

Departamento La Paz

Fuente: Sabbatini R.et al. (2009c)



ANEXO 4: Análisis de fiabilidad de los clasificadores

EN IMAGEN MARZO 2005

Error Matrix Analysis of IMAGEN_VERDAD (columns: truth) against MAKLIKE (rows: mapped)

	1	2	3	4	5	
1	8	0	0	0	0	0.0000
2	0	12	1	0	0	0.0769
3	0	0	9	4	0	0.3077
4	0	0	0	5	0	0.0000
5	0	0	0	0	8	0.0000
6	0	0	0	0	0	0.0000
Total	8	12	10	9	8	
ErrorO	0.0000	0.0000	0.1000	0.4444	0.0000	

	6	Total	ErrorC
1	0	8	0.0000
2	0	13	0.0769
3	0	13	0.3077
4	0	5	0.0000
5	0	8	0.0000
6	12	12	0.0000
Total	12	59	
ErrorO	0.0000		0.0847

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.0596 (0.0251 - 0.1444)
 95% Confidence Interval = 0.0711 (0.0137 - 0.1558)
 99% Confidence Interval = 0.0935 (0.0000 - 0.1783)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using MAKLIKE as the reference image ...

Category	KIA
1	1.0000
2	0.9034
3	0.6295
4	1.0000
5	1.0000
6	1.0000

IMAGEN_VERDAD

Category	KIA
1	1.0000
2	1.0000
3	0.8717
4	0.5144
5	1.0000
6	1.0000

Overall Kappa = 0.8975

Anexos

Error Matrix Analysis of IMAGEN_VERDAD (columns : truth) against MINDIST (rows : mapped)

	1	2	3	4	5	
1	8	0	0	0	0	0.0000
2	0	12	1	0	0	0.0769
3	0	0	9	1	0	0.1000
4	0	0	0	8	0	0.0000
5	0	0	0	0	8	0.0000
6	0	0	0	0	0	0.0000
Total	8	12	10	9	8	
ErrorO	0.0000	0.0000	0.1000	0.1111	0.0000	

	6	Total	ErrorC
1	0	8	0.0000
2	0	13	0.0769
3	0	10	0.1000
4	0	8	0.0000
5	0	8	0.0000
6	12	12	0.0000
Total	12	59	
ErrorO	0.0000		0.0339

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.0388 (0.0000 - 0.0727)
 95% Confidence Interval = 0.0462 (0.0000 - 0.0801)
 99% Confidence Interval = 0.0608 (0.0000 - 0.0947)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using MINDIST as the reference image ...

Category	KIA
1	1.0000
2	0.9034
3	0.8796
4	1.0000
5	1.0000
6	1.0000

IMAGEN_VERDAD

Category	KIA
1	1.0000
2	1.0000
3	0.8796
4	0.8715
5	1.0000
6	1.0000

Overall Kappa = 0.9590

Anexos

Error Matrix Analysis of IMAGEN_VERDAD (columns : truth) against PIPED (rows : mapped)

	1	2	3	4	5	
0	0	2	0	0	0	1.0000
1	8	0	0	0	0	0.0000
2	0	7	0	0	0	0.0000
3	0	3	1	0	0	0.7500
4	0	0	9	9	0	0.5000
5	0	0	0	0	8	0.0000
6	0	0	0	0	0	0.0000
Total	8	12	10	9	8	
ErrorO	0.0000	0.4167	0.9000	0.0000	0.0000	

	6	Total	ErrorC
0	7	9	1.0000
1	0	8	0.0000
2	0	7	0.0000
3	0	4	0.7500
4	0	18	0.5000
5	0	8	0.0000
6	5	5	0.0000
Total	12	59	
ErrorO	0.5833		0.3559

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.1025 (0.2534 - 0.4585)
 95% Confidence Interval = 0.1222 (0.2338 - 0.4781)
 99% Confidence Interval = 0.1608 (0.1951 - 0.5168)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using PIPED as the reference image ...

Category	KIA
0	0.0000
1	1.0000
2	1.0000
3	0.0969
4	0.4100
5	1.0000
6	1.0000

IMAGEN_VERDAD

Category	KIA
1	1.0000
2	0.5272
3	0.0345
4	1.0000
5	1.0000
6	0.3627

Overall Kappa = 0.5880

Anexos

EN IMAGEN ENERO 2010

Error Matrix Analysis of IMG_VERIFICA (columns: truth) against MAXLIKE (rows: mapped)

	1	2	3	4	5	
1	8	0	0	0	0	0.0000
2	0	12	0	0	1	0.0769
3	0	0	6	0	0	0.0000
4	0	0	1	6	0	0.2500
5	1	1	0	0	8	0.2000
6	0	0	0	0	0	0.0000
Total	9	13	7	6	9	
ErrorO	0.1111	0.0769	0.1429	0.0000	0.1111	

	6	Total	ErrorC
1	0	8	0.0000
2	0	13	0.0769
3	0	6	0.0000
4	1	8	0.2500
5	0	10	0.2000
6	8	8	0.0000
Total	9	53	
ErrorO	0.1111		0.0943

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.0660 (0.0283 - 0.1604)
 95% Confidence Interval = 0.0787 (0.0156 - 0.1730)
 99% Confidence Interval = 0.1036 (0.0000 - 0.1979)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using MAXLIKE as the reference image ...

Category	KIA
1	1.0000
2	0.8981
3	1.0000
4	0.7181
5	0.7591
6	1.0000

IMG_VERIFICA

Category	KIA
1	0.8691
2	0.8981
3	0.8389
4	1.0000
5	0.8630
6	0.8691

Overall Kappa = 0.8856

Anexos

Error Matrix Analysis of IMG_VERIFICA (columns : truth) against MINDIST (rows : mapped)

	1	2	3	4	5	
1	9	0	0	0	0	0.0000
2	0	13	0	0	0	0.0000
3	0	0	4	0	0	0.0000
4	0	0	1	6	0	0.1429
5	0	0	2	0	9	0.1818
6	0	0	0	0	0	0.0000
Total	9	13	7	6	9	
ErrorO	0.0000	0.0000	0.4286	0.0000	0.0000	

	6	Total	ErrorC
1	0	9	0.0000
2	0	13	0.0000
3	0	4	0.0000
4	0	7	0.1429
5	0	11	0.1818
6	9	9	0.0000
Total	9	53	
ErrorO	0.0000		0.0566

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.0522 (0.0044 - 0.1088)
 95% Confidence Interval = 0.0622 (0.0000 - 0.1188)
 99% Confidence Interval = 0.0819 (0.0000 - 0.1385)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using MINDIST as the reference image ...

Category	KIA
1	1.0000
2	1.0000
3	1.0000
4	0.8389
5	0.7810
6	1.0000

IMG_VERIFICA

Category	KIA
1	1.0000
2	1.0000
3	0.5364
4	1.0000
5	1.0000
6	1.0000

Overall Kappa = 0.9311

Anexos

Error Matrix Analysis of VERIFICA (columns : truth) against PIPED (rows : mapped)

	1	2	3	4	5	
0	0	0	0	0	1	1.0000
1	9	0	0	0	0	0.0000
2	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	1.0000
4	0	0	0	4	0	0.0000
5	0	13	7	0	8	0.7143
6	0	0	0	2	0	0.2000
Total	9	13	7	6	9	
ErrorO	0.0000	1.0000	1.0000	0.3333	0.1111	

	6	Total	ErrorC
0	0	1	1.0000
1	0	9	0.0000
2	0	0	
3	1	1	1.0000
4	0	4	0.0000
5	0	28	0.7143
6	8	10	0.2000
Total	9	53	
ErrorO	0.1111		0.4528

ErrorO = Errors of Omission (expressed as proportions)
 ErrorC = Errors of Commission (expressed as proportions)

90% Confidence Interval = 0.1125 (0.3404 - 0.5653)
 95% Confidence Interval = 0.1340 (0.3188 - 0.5868)
 99% Confidence Interval = 0.1764 (0.2764 - 0.6292)

KAPPA INDEX OF AGREEMENT (KIA)

Using PIPED as the reference image ...

Category	KIA
0	0.0000
1	1.0000
2	0.0000
3	-0.1522
4	1.0000
5	0.1396
6	0.7591

VERIFICA

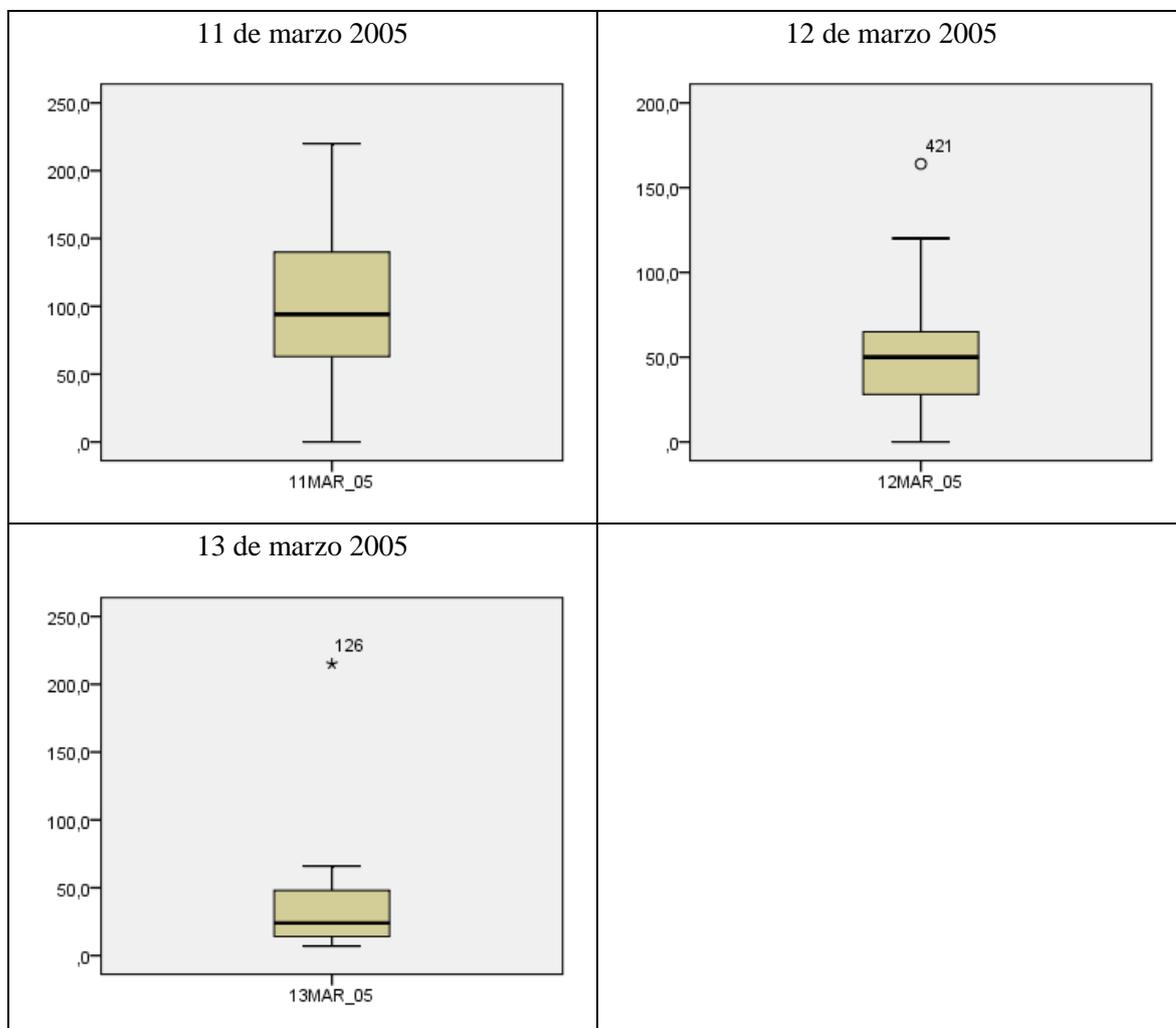
Category	KIA
1	1.0000
2	0.0000
3	-0.0192
4	0.6395
5	0.7644
6	0.8630

Overall Kappa = 0.4599

ANEXO 5: Análisis exploratorio de los datos pluviométricos

ANÁLISIS VALORES ATÍPICOS EVENTO MARZO 2005

a) Diagramas de caja de las series de datos pluviométricos diarios



Referencias:

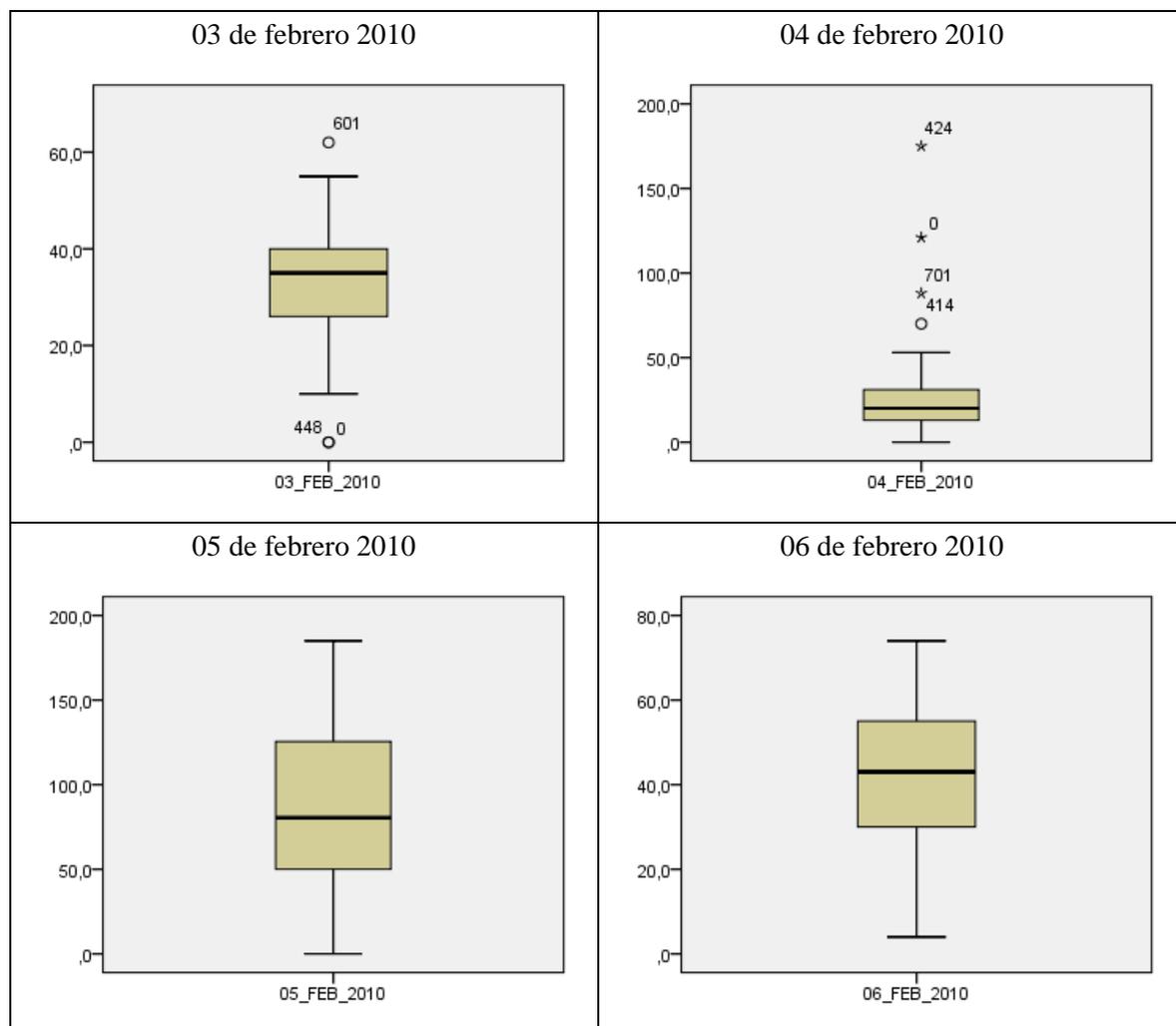
- * Dato extremo (alejado del extremo de la caja una distancia superior a 3 veces la longitud intercuartil)
- Dato atípico (alejado del extremo de la caja una distancia entre 1,5 y 3 veces la longitud intercuartil).

La etiqueta del símbolo indica el número de estación.

Anexos

b) Aplicación de la metodología del Water Resources Council

PLUVIOMETRO		11MAR	12MAR	13MAR	11MAR		12MAR		13MAR	
Id.	Nombre	mm	mm	mm	Log. (dato)	Prueba dato dudoso	Log. (dato)	Prueba dato dudoso	Log. (dato)	Prueba dato dudoso
0	Paso Medina	126,0	43,5		2,10	Ok	1,64	Ok	0,00	Ok
102	Banderas	185	50		2,27	Ok	1,70	Ok	0,00	Ok
104	Cma Avigdor	104	54		2,02	Ok	1,73	Ok	0,00	Ok
107	San Jose de Feliciano	36,5	92,5	8,5	1,56	Ok	1,97	Ok	0,93	Ok
108	El Cimarron	76	0		1,88	Ok	0,00	Dud.bajo	0,00	Ok
109	El Carmen	220	59		2,34	Ok	1,77	Ok	0,00	Ok
110	El Quebracho	170	40		2,23	Ok	1,60	Ok	0,00	Ok
111	Estacas	152	32		2,18	Ok	1,51	Ok	0,00	Ok
112	La Lila	48	74	48	1,68	Ok	1,87	Ok	1,68	Ok
113	La Esmeralda	0	120		0,00	Ok	2,08	Ok	0,00	Ok
114	La Verbena	75	64		1,88	Ok	1,81	Ok	0,00	Ok
115	La Calandria	63	62	5	1,80	Ok	1,79	Ok	0,70	Ok
121	San Gustavo	195	50		2,29	Ok	1,70	Ok	0,00	Ok
124	Atencio-Subcomisaria	82	35		1,91	Ok	1,54	Ok	0,00	Ok
125	Comisaria Yeso Oeste	150	56		2,18	Ok	1,75	Ok	0,00	Ok
126	Estaquitas	0	0	215	0,00	Ok	0,00	Dud.bajo	2,33	Dud.alto
402	Conscripto Bernardi	109	102	14	2,04	Ok	2,01	Ok	1,15	Ok
407	Federal	97	15	0	1,99	Ok	1,18	Ok	0,00	Ok
414	Los Conquistadores	94	13		1,97	Ok	1,11	Ok	0,00	Ok
417	Nueva Vizcaya	58	72	7	1,76	Ok	1,86	Ok	0,85	Ok
418	Elias Romero	55	35	20	1,74	Ok	1,54	Ok	1,30	Ok
421	Sauce de Luna	0	164		0,00	Ok	2,21	Ok	0,00	Ok
424	Chañar	84	35	23	1,92	Ok	1,54	Ok	1,36	Ok
443	Federal - Jefatura	79	37		1,90	Ok	1,57	Ok	0,00	Ok
448	Bella Union	95	13		1,98	Ok	1,11	Ok	0,00	Ok
601	Rincon del Chañar	73	59		1,86	Ok	1,77	Ok	0,00	Ok
602	Las Multas	106	79		2,03	Ok	1,90	Ok	0,00	Ok
603	San Victor	109	35	25	2,04	Ok	1,54	Ok	1,40	Ok
604	Paso Telégrafo	0	96	42	0,00	Ok	1,98	Ok	1,62	Ok
605	Pte. de Hierro	76	60		1,88	Ok	1,78	Ok	0,00	Ok
606	Tacuara Ombu	140	65		2,15	Ok	1,81	Ok	0,00	Ok
607	Mulas Grandes	165	0		2,22	Ok	0,00	Dud.bajo	0,00	Ok
701	Est. Buena Esperanza	105	27		2,02	Ok	1,43	Ok	0,00	Ok
705	San Jaime Corralon	70	28		1,85	Ok	1,45	Ok	0,00	Ok
707	San Jaime Caminera	0	105		0,00	Ok	2,02	Ok	0,00	Ok
803	Colonia Oficial No 3	112	18		2,05	Ok	1,26	Ok	0,00	Ok
809	La Paz Comisaria 1o	166	18	66	2,22	Ok	1,26	Ok	1,82	Ok
816	Tacuara Yacare	140	20		2,15	Ok	1,30	Ok	0,00	Ok
822	La Paz - Subprefectura	100	35		2,00	Ok	1,54	Ok	0,00	Ok
Prueba de dato dudoso (Water Resources Council, 1981)										
Media					1,75		1,53		0,39	
Desviación Estándar					0,70		0,52		0,67	
Tamaño de la muestra					39		39		39	
Valor de K_N (Chow, 1994. Pag. 416)					2,671		2,671		2,671	
Umbral de dato dudoso alto					3,61		2,92		2,19	
Umbral de dato dudoso bajo					-0,13		0,15		-1,41	

ANÁLISIS VALORES ATÍPICOS EVENTO FEBRERO 2010**a) Diagramas de caja de las series de datos pluviométricos diarios****Referencias:**

- * Dato extremo (alejado del extremo de la caja una distancia superior a 3 veces la longitud intercuartil)
- Dato atípico (alejado del extremo de la caja una distancia entre 1,5 y 3 veces la longitud intercuartil).

La etiqueta del símbolo indica el número de estación.

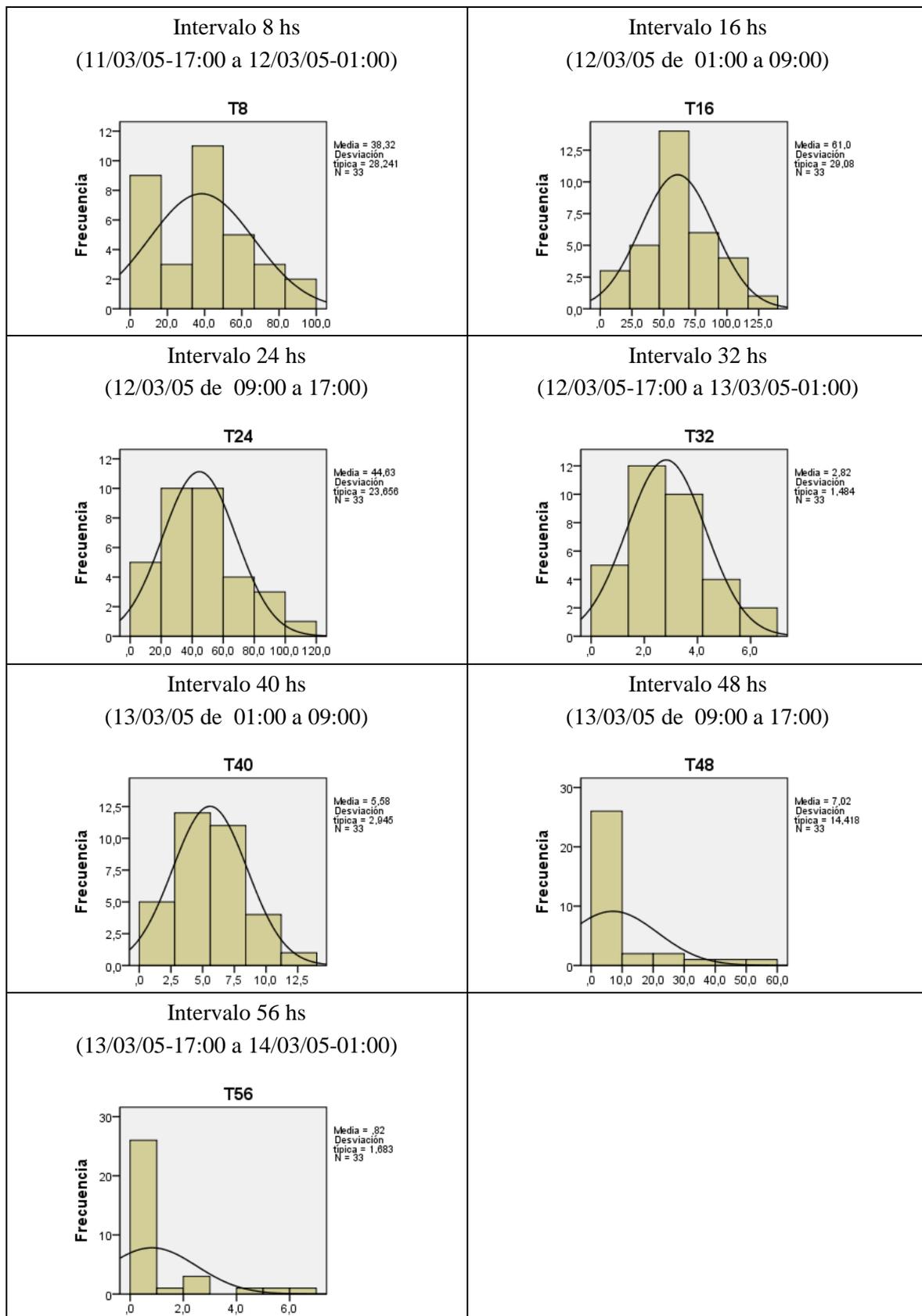
Anexos

b) Aplicación de la Metodología del Water Resources Council

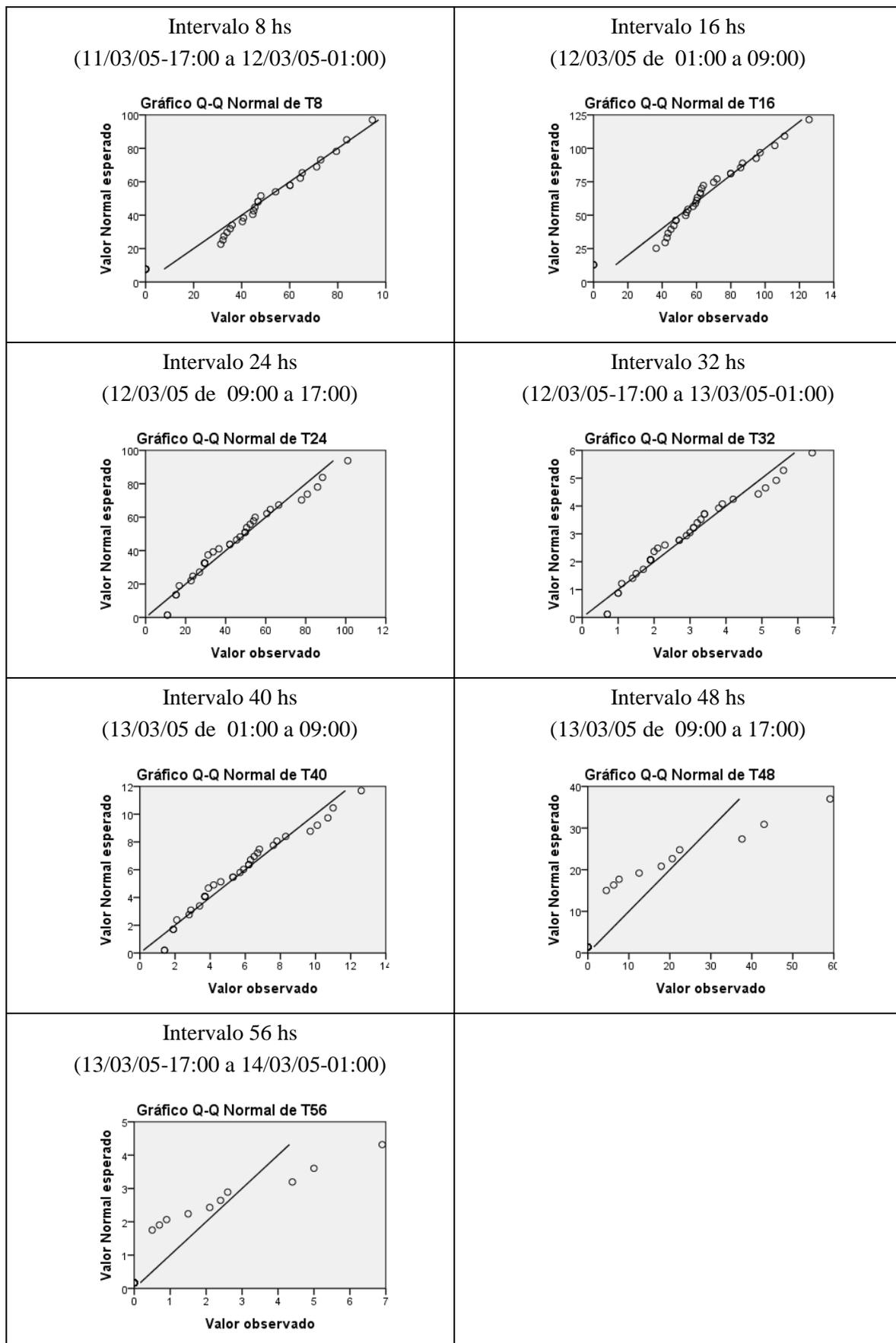
PLUVIOMETRO		03FEB	04FEB	05FEB	06FEB	03FEB		04FEB		05FEB		06FEB	
Id.	Nombre	mm	mm	mm	mm	Log.	Prueba	Log.	Prueba	Log.	Prueba	Log.	Prueba
						(dato)	dato dudoso	(dato)	dato dudoso	(dato)	dato dudoso	(dato)	dato dudoso
0	Paso Medina	0,0	121,0	0,0		0,00	Dud.bajo	2,08	Ok	0,00	Ok	0,00	Ok
102	Banderas	10,0	25,0	123,0		1,00	Ok	1,40	Ok	2,09	Ok	0,00	Ok
104	Cnia Avigdor	35,0	12,0	165,0		1,54	Ok	1,08	Ok	2,22	Ok	0,00	Ok
107	San Jose de Feliciano	33,0	30,0	81,0		1,52	Ok	1,48	Ok	1,91	Ok	0,00	Ok
108	El Cimarron	19,0	4,0	185,0		1,28	Ok	0,60	Ok	2,27	Ok	0,00	Ok
109	El Camen	42,0	15,0	140,0		1,62	Ok	1,18	Ok	2,15	Ok	0,00	Ok
110	El Quebracho	40,0	20,0	135,0		1,60	Ok	1,30	Ok	2,13	Ok	0,00	Ok
111	Estacas	43,0	0,0	110,0		1,63	Ok	0,00	Ok	2,04	Ok	0,00	Ok
112	La Lila	31,0	16,0	90,0	36,0	1,49	Ok	1,20	Ok	1,95	Ok	1,56	Ok
113	La Esmeralda	26,0	31,0	75,0		1,41	Ok	1,49	Ok	1,88	Ok	0,00	Ok
114	La Verbena	38,0	13,0	75,0		1,58	Ok	1,11	Ok	1,88	Ok	0,00	Ok
115	La Calandria	28,0	5,0	80,0		1,45	Ok	0,70	Ok	1,90	Ok	0,00	Ok
121	San Gustavo	39,0	47,0	22,0		1,59	Ok	1,67	Ok	1,34	Ok	0,00	Ok
122	Atencio (Est. Santa Maria)	32,0	29,0	87,0		1,51	Ok	1,46	Ok	1,94	Ok	0,00	Ok
124	Atencio-Subcomisaria	55,0	40,0	115,0		1,74	Ok	1,60	Ok	2,06	Ok	0,00	Ok
125	Comisaria Yeso Oeste	40,0	6,0	128,0		1,60	Ok	0,78	Ok	2,11	Ok	0,00	Ok
126	Estaquitas	36,0	13,0	60,0		1,56	Ok	1,11	Ok	1,78	Ok	0,00	Ok
127	Destacamento San Pedro	42,0	30,0	0,0		1,62	Ok	1,48	Ok	0,00	Ok	0,00	Ok
128	La Hiera	22,0	32,0	76,0		1,34	Ok	1,51	Ok	1,88	Ok	0,00	Ok
402	Conscripto Bernardi	38,0	12,0	133,0		1,58	Ok	1,08	Ok	2,12	Ok	0,00	Ok
407	Federal	23,0	28,0	120,0	55,0	1,36	Ok	1,45	Ok	2,08	Ok	1,74	Dud.alto
414	Los Conquistadores	34,0	70,0	45,0	74,0	1,53	Ok	1,85	Ok	1,65	Ok	1,87	Dud.alto
417	Nueva Vizcaya	55,0	25,0	88,0		1,74	Ok	1,40	Ok	1,94	Ok	0,00	Ok
418	Elias Romero	50,0	15,0	160,0	50,0	1,70	Ok	1,18	Ok	2,20	Ok	1,70	Dud.alto
421	Sauce de Luna	23,0	20,0	151,0		1,36	Ok	1,30	Ok	2,18	Ok	0,00	Ok
424	Chañar	35,0	175,0	0,0		1,54	Ok	2,24	Ok	0,00	Ok	0,00	Ok
428	Mojones Norte - Comisaria	51,0	14,0	150,0		1,71	Ok	1,15	Ok	2,18	Ok	0,00	Ok
443	Federal - Jefatura	36,0	25,0	185,0		1,56	Ok	1,40	Ok	2,27	Ok	0,00	Ok
448	Bella Union	0,0	51,0	15,0		0,00	Dud.bajo	1,71	Ok	1,18	Ok	0,00	Ok
601	Rincon del Chañar	62,0	20,0	64,0		1,79	Ok	1,30	Ok	1,81	Ok	0,00	Ok
602	Las Mulitas	37,0	30,0	45,0		1,57	Ok	1,48	Ok	1,65	Ok	0,00	Ok
603	San Victor	35,0	0,0	77,0		1,54	Ok	0,00	Ok	1,89	Ok	0,00	Ok
604	Paso Telégrafo	40,0	48,0	0		1,60	Ok	1,68	Ok	0,00	Ok	0,00	Ok
605	Pte. de Hierro	36,0	30,0	55,0		1,56	Ok	1,48	Ok	1,74	Ok	0,00	Ok
606	Tacuara Ombu	35,0	19,0	70,0		1,54	Ok	1,28	Ok	1,85	Ok	0,00	Ok
607	Mulas Grandes	43,0	15,0	40,0		1,63	Ok	1,18	Ok	1,60	Ok	0,00	Ok
608	Rincon de Mesa	25,0	0	75,0		1,40	Ok	0,00	Ok	1,88	Ok	0,00	Ok
701	Estancia Buena Esperanza	33,0	88,0	0,0	4,0	1,52	Ok	1,94	Ok	0,00	Ok	0,60	Ok
705	San Jaime Corralón	20,0	30,0	100,0		1,30	Ok	1,48	Ok	2,00	Ok	0,00	Ok
707	San Jaime Caminera	13,0	18,0	56,0		1,11	Ok	1,26	Ok	1,75	Ok	0,00	Ok
803	Colonia Oficial No 3	23,0	13,0	117,0		1,36	Ok	1,11	Ok	2,07	Ok	0,00	Ok
809	La Paz Comisaria 1o	35,0	37,0	40,0		1,54	Ok	1,57	Ok	1,60	Ok	0,00	Ok
816	Tacuara Yacare	45,0	9,0	115,0		1,65	Ok	0,95	Ok	2,06	Ok	0,00	Ok
822	La Paz - Subprefectura	35,0	7,0	68,0	30,0	1,54	Ok	0,85	Ok	1,83	Ok	1,48	Ok
909	El Redomon - Destacamento	47,0	53,0	138,0		1,67	Ok	1,72	Ok	2,14	Ok	0,00	Ok
Prueba de dato dudoso (Water Resources Council, 1981)													
Media						1,46		1,27		1,72		0,20	
Desviación Estándar						0,35		0,48		0,65		0,54	
Tamaño de la muestra						45		45		45		45	
Valor de K _N (Chow, 1994. Pag. 416)						2,727		2,727		2,727		2,727	
Umbral de dato dudoso alto						2,42		2,58		3,50		1,66	
Umbral de dato dudoso bajo						0,50		-0,04		-0,07		-1,27	

ANÁLISIS DE NORMALIDAD DATOS MARZO 2005

a) Histogramas



b) Gráficos Q-Q Normal



Anexos

c) Test de Kolmogorov Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

	11MAR	12MAR	13MAR	TOTAL	18	116	124	132	140	148	156
N	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Parámetros normales,a,b											
Media	99,318	53,000	7,833	160,152	38,318	61,003	44,627	2,824	5,576	7,015	,818
Desviación típica	54,5321	28,1005	16,1006	48,0715	28,2413	29,0804	23,6562	1,4839	2,9446	14,4179	1,6827
Diferencias más extremas											
Absoluta	,105	,109	,384	,193	,185	,132	,109	,111	,109	,384	,384
Positiva	,105	,109	,384	,193	,185	,126	,109	,111	,109	,384	,384
Negativa	-,057	-,077	-,313	-,098	-,129	-,132	-,077	-,076	-,078	-,313	-,313
Z de Kolmogorov-Smirnov	,603	,628	2,204	1,106	1,065	,759	,625	,640	,628	2,204	2,203
Sig. asintót. (bilateral)	,860	,825	,000	,173	,207	,611	,830	,807	,825	,000	,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

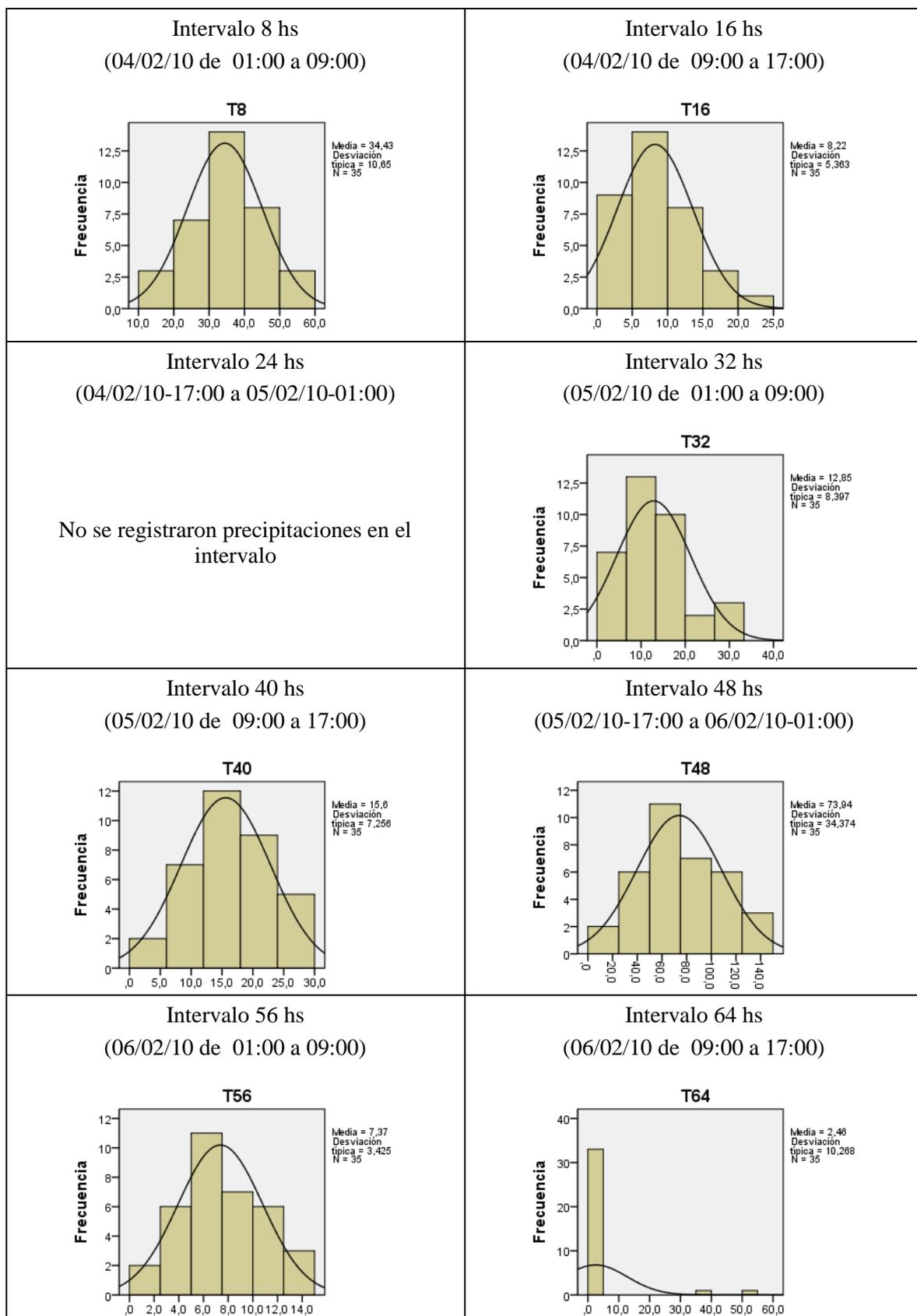
b. Se han calculado a partir de los datos.

Condición de Normalidad:

Si: Sig.asintót. $> \alpha (0,05) \Rightarrow$ Se acepta la Hipótesis H_0 (los datos analizados se ajustan a una distribución normal).

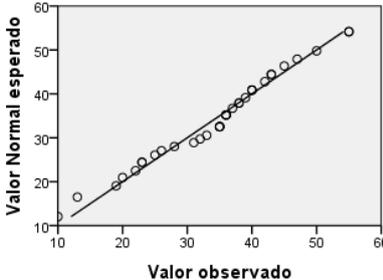
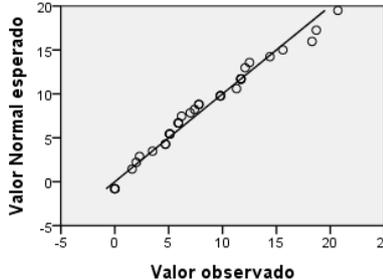
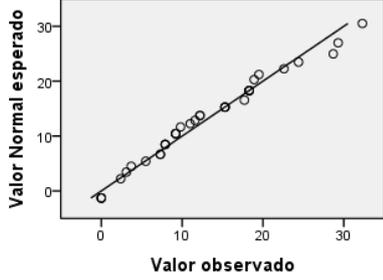
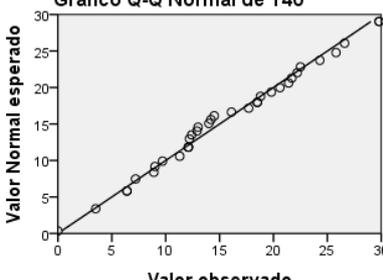
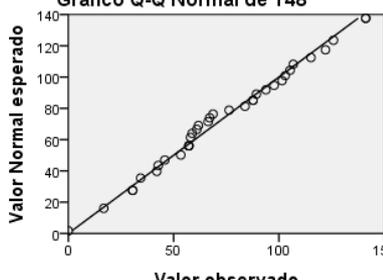
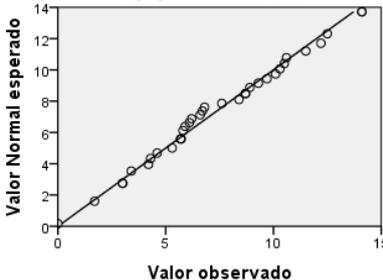
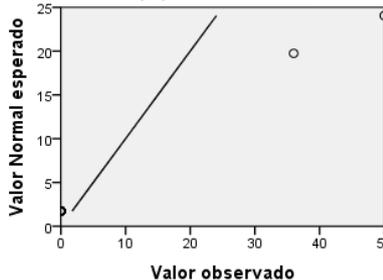
ANÁLISIS DE NORMALIDAD DATOS FEBRERO 2010

a) Histogramas



Anexos

b) Gráficos Q-Q Normal

<p style="text-align: center;">Intervalo 8 hs (04/02/10 de 01:00 a 09:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T8</p> 	<p style="text-align: center;">Intervalo 16 hs (04/02/10 de 09:00 a 17:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T16</p> 
<p style="text-align: center;">Intervalo 24 hs (04/02/10-17:00 a 05/02/10-01:00)</p> <p style="text-align: center;">No se registraron precipitaciones en el intervalo</p>	<p style="text-align: center;">Intervalo 32 hs (05/02/10 de 01:00 a 09:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T32</p> 
<p style="text-align: center;">Intervalo 40 hs (05/02/10 de 09:00 a 17:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T40</p> 	<p style="text-align: center;">Intervalo 48 hs (05/02/10-17:00 a 06/02/10-01:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T48</p> 
<p style="text-align: center;">Intervalo 56 hs (06/02/10 de 01:00 a 09:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T56</p> 	<p style="text-align: center;">Intervalo 64 hs (06/02/10 de 09:00 a 17:00)</p> <p style="text-align: center;">Gráfico Q-Q Normal de T64</p> 

Anexos

c) Test de Kolmogorov Smirnov

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

	3-feb	4-feb	5-feb	6-feb	TOTAL	T8	T16	T24	T32	T40	T48	T56	T64	
N	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	
Parámetros	Media	34,429	21,057	96,914	2,457	154,857	34,429	8,223	,000	12,854	15,600	73,943	7,369	2,457
normalesa,b	Desviación típica	10,6503	13,7647	45,0414	10,2680	47,5018	10,6503	5,3630	,00000c	8,3970	7,2560	34,3735	3,4252	10,2680
Diferencias	Absoluta	,150	,102	,104	,537	,113	,150	,104		,102	,103	,103	,109	,537
más extremas	Positiva	,072	,102	,104	,537	,113	,072	,104		,102	,103	,103	,109	,537
	Negativa	-,150	-,063	-,056	-,405	-,077	-,150	-,063		-,063	-,058	-,056	-,056	-,405
Z de Kolmogorov-Smirnov		,887	,604	,614	3,179	,671	,887	,616		,606	,610	,612	,644	3,179
Sig. asintót. (bilateral)		,411	,859	,845	,000	,759	,411	,842		,856	,851	,848	,802	,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

c. La distribución no tiene varianza para esta variable. No es posible realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra.

Condición de Normalidad:

Si: Sig.asintót. $> \alpha (0,05) \Rightarrow$ Se acepta la Hipótesis Ho (los datos analizados se ajustan a una distribución normal).

ANEXO 6: Errores de predicción de los mapas de precipitación

EVENTO MARZO 2005

<p>Mapa 1 (0 a 8 hs) 11/03/05 17:00 a 12/03/05 01:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.9971659</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>21.9906</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.0310918</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.012073</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>21.5226</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	0.9971659	Root-Mean-Square	21.9906	Mean Standardized	0.0310918	Root-Mean-Square Stan...	1.012073	Average Standard Error	21.5226	<p>Mapa 2 (8 a 16 hs) 12/03/05 01:00 a 12/03/05 09:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>1.487348</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>23.27276</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.04692177</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.038854</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>21.54627</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	1.487348	Root-Mean-Square	23.27276	Mean Standardized	0.04692177	Root-Mean-Square Stan...	1.038854	Average Standard Error	21.54627
Samples	33 of 33																								
Mean	0.9971659																								
Root-Mean-Square	21.9906																								
Mean Standardized	0.0310918																								
Root-Mean-Square Stan...	1.012073																								
Average Standard Error	21.5226																								
Samples	33 of 33																								
Mean	1.487348																								
Root-Mean-Square	23.27276																								
Mean Standardized	0.04692177																								
Root-Mean-Square Stan...	1.038854																								
Average Standard Error	21.54627																								
<p>Mapa 3 (16 a 24 hs) 12/03/05 09:00 a 12/03/05 17:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.5669702</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>24.20202</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>-0.01539543</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.043921</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>22.8209</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	-0.5669702	Root-Mean-Square	24.20202	Mean Standardized	-0.01539543	Root-Mean-Square Stan...	1.043921	Average Standard Error	22.8209	<p>Mapa 4 (24 a 32 hs) 12/03/05 17:00 a 13/03/05 01:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.03584638</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>1.520301</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>-0.01456282</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.045594</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>1.426486</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	-0.03584638	Root-Mean-Square	1.520301	Mean Standardized	-0.01456282	Root-Mean-Square Stan...	1.045594	Average Standard Error	1.426486
Samples	33 of 33																								
Mean	-0.5669702																								
Root-Mean-Square	24.20202																								
Mean Standardized	-0.01539543																								
Root-Mean-Square Stan...	1.043921																								
Average Standard Error	22.8209																								
Samples	33 of 33																								
Mean	-0.03584638																								
Root-Mean-Square	1.520301																								
Mean Standardized	-0.01456282																								
Root-Mean-Square Stan...	1.045594																								
Average Standard Error	1.426486																								
<p>Mapa 5 (32 a 40 hs) 13/03/05 01:00 a 13/03/05 09:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.07259539</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>3.043211</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>-0.01412374</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.057756</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>2.815367</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	-0.07259539	Root-Mean-Square	3.043211	Mean Standardized	-0.01412374	Root-Mean-Square Stan...	1.057756	Average Standard Error	2.815367	<p>Mapa 6 (40 a 48 hs) 13/03/05 09:00 a 13/03/05 17:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-1.05253</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>15.5545</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	-1.05253	Root-Mean-Square	15.5545						
Samples	33 of 33																								
Mean	-0.07259539																								
Root-Mean-Square	3.043211																								
Mean Standardized	-0.01412374																								
Root-Mean-Square Stan...	1.057756																								
Average Standard Error	2.815367																								
Samples	33 of 33																								
Mean	-1.05253																								
Root-Mean-Square	15.5545																								
<p>Mapa 7 (48 a 56 hs) 13/03/05 17:00 a 14/03/05 01:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>33 of 33</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.1238343</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>1.814874</td></tr> </table>	Samples	33 of 33	Mean	-0.1238343	Root-Mean-Square	1.814874																			
Samples	33 of 33																								
Mean	-0.1238343																								
Root-Mean-Square	1.814874																								

Anexos

EVENTO FEBRERO 2010

<p>Mapa 1 (0 a 8 hs) 04/02/10 01:00 a 04/02/10 09:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.01797988</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>9.731731</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.0002886249</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>0.9955523</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>9.849667</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0.01797988	Root-Mean-Square	9.731731	Mean Standardized	0.0002886249	Root-Mean-Square Stan...	0.9955523	Average Standard Error	9.849667	<p>Mapa 2 (8 a 16 hs) 04/02/10 09:00 a 04/02/10 17:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.03358627</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>6.236685</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>-0.005864585</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.128736</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>5.422864</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	-0.03358627	Root-Mean-Square	6.236685	Mean Standardized	-0.005864585	Root-Mean-Square Stan...	1.128736	Average Standard Error	5.422864
Samples	35 of 35																								
Mean	0.01797988																								
Root-Mean-Square	9.731731																								
Mean Standardized	0.0002886249																								
Root-Mean-Square Stan...	0.9955523																								
Average Standard Error	9.849667																								
Samples	35 of 35																								
Mean	-0.03358627																								
Root-Mean-Square	6.236685																								
Mean Standardized	-0.005864585																								
Root-Mean-Square Stan...	1.128736																								
Average Standard Error	5.422864																								
<p>Mapa 3 (16 a 24 hs) 04/02/10 17:00 a 05/02/10 01:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>0</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0	Root-Mean-Square	0	<p>Mapa 4 (24 a 32 hs) 05/02/10 01:00 a 05/02/10 09:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.1374428</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>10.09811</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.009702151</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.114417</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>8.856982</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0.1374428	Root-Mean-Square	10.09811	Mean Standardized	0.009702151	Root-Mean-Square Stan...	1.114417	Average Standard Error	8.856982						
Samples	35 of 35																								
Mean	0																								
Root-Mean-Square	0																								
Samples	35 of 35																								
Mean	0.1374428																								
Root-Mean-Square	10.09811																								
Mean Standardized	0.009702151																								
Root-Mean-Square Stan...	1.114417																								
Average Standard Error	8.856982																								
<p>Mapa 5 (32 a 40 hs) 05/02/10 09:00 a 05/02/10 17:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.1006526</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>5.827809</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.01442007</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.025687</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>5.683395</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0.1006526	Root-Mean-Square	5.827809	Mean Standardized	0.01442007	Root-Mean-Square Stan...	1.025687	Average Standard Error	5.683395	<p>Mapa 6 (40 a 48 hs) 05/02/10 17:00 a 06/02/10 01:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.3193089</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>27.94149</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.008543326</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.036965</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>26.90317</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0.3193089	Root-Mean-Square	27.94149	Mean Standardized	0.008543326	Root-Mean-Square Stan...	1.036965	Average Standard Error	26.90317
Samples	35 of 35																								
Mean	0.1006526																								
Root-Mean-Square	5.827809																								
Mean Standardized	0.01442007																								
Root-Mean-Square Stan...	1.025687																								
Average Standard Error	5.683395																								
Samples	35 of 35																								
Mean	0.3193089																								
Root-Mean-Square	27.94149																								
Mean Standardized	0.008543326																								
Root-Mean-Square Stan...	1.036965																								
Average Standard Error	26.90317																								
<p>Mapa 7 (48 a 56 hs) 06/02/10 01:00 a 06/02/10 09:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>0.03180534</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>2.783163</td></tr> <tr><td>Mean Standardized</td><td>0.008543326</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square Stan...</td><td>1.036965</td></tr> <tr><td>Average Standard Error</td><td>2.679739</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	0.03180534	Root-Mean-Square	2.783163	Mean Standardized	0.008543326	Root-Mean-Square Stan...	1.036965	Average Standard Error	2.679739	<p>Mapa 8 (56 a 64 hs) 06/02/10 09:00 a 06/02/10 17:00 hs</p> <p>Prediction Errors</p> <table> <tr><td>Samples</td><td>35 of 35</td></tr> <tr><td>Mean</td><td>-0.2110888</td></tr> <tr><td>Root-Mean-Square</td><td>11.99886</td></tr> </table>	Samples	35 of 35	Mean	-0.2110888	Root-Mean-Square	11.99886						
Samples	35 of 35																								
Mean	0.03180534																								
Root-Mean-Square	2.783163																								
Mean Standardized	0.008543326																								
Root-Mean-Square Stan...	1.036965																								
Average Standard Error	2.679739																								
Samples	35 of 35																								
Mean	-0.2110888																								
Root-Mean-Square	11.99886																								

ANEXO 7: Procedimiento para la creación de archivos en grilla para HEC-HMS

APLICACIÓN

El procedimiento que se detalla se aplicó en esta tesis para obtener los archivos de precipitación y CN en grilla en formato DSS para HEC-HMS requeridos para la modelación distribuida con ModClark.

INFORMACIÓN DE BASE REQUERIDA

La información de base es el mapa en formato raster de CN o de precipitación y el archivo shape denominado *GridCellIntersect* que se genera en HEC-GeoHMS durante la creación del modelo de cuenca distribuido. Todos los archivos deben estar en el mismo sistema de coordenadas.

PROCEDIMIENTO GENERAL

La metodología básicamente consiste la ejecución de tres pasos:

1. Asignar a cada celda del archivo vectorial *GridCellIntersect* el valor de CN ó de precipitación mediante intersección con el mapa raster correspondiente. Un nuevo campo para cada conjunto de datos se crea en la tabla de atributo.
2. Generar los archivos en grilla en formato ASCII del dato de interés a partir del archivo *GridCellIntersect*.
3. Convertir los Archivos ASCII al formato DSS de HEC-HMS.

SOFTWARE APLICADO

El procesamiento de los datos se realiza en ArcGIS y para la conversión de los archivos ASCII a formato DSS se aplica un ejecutable desarrollado por el USACE denominado *asc2dssGrid.exe*.

PROCEDIMIENTO PASO A PASO

1) **ASIGNAR DATOS DE CN Y PRECIPITACIÓN A LAS CELDAS**

En ArcGIS se carga el modelo de cuenca conteniendo el layer² *GridCellIntersect* como el que se indica en Figura A7- 1. Este archivo vectorial es obtenido por intersección de la cuenca con la grilla adoptada y en dicho proceso se asigna automáticamente a cada celda los valores del área de la celda (Cell_Area), un número identificador (Cell_ID), el

² Layer: capa de información geográfica

nombre de la subcuenca dentro de la cual se localiza (Name), las coordenadas (Cell_X y Cell_Y) y la longitud de viaje de cada celda hasta la salida (FlowLength).

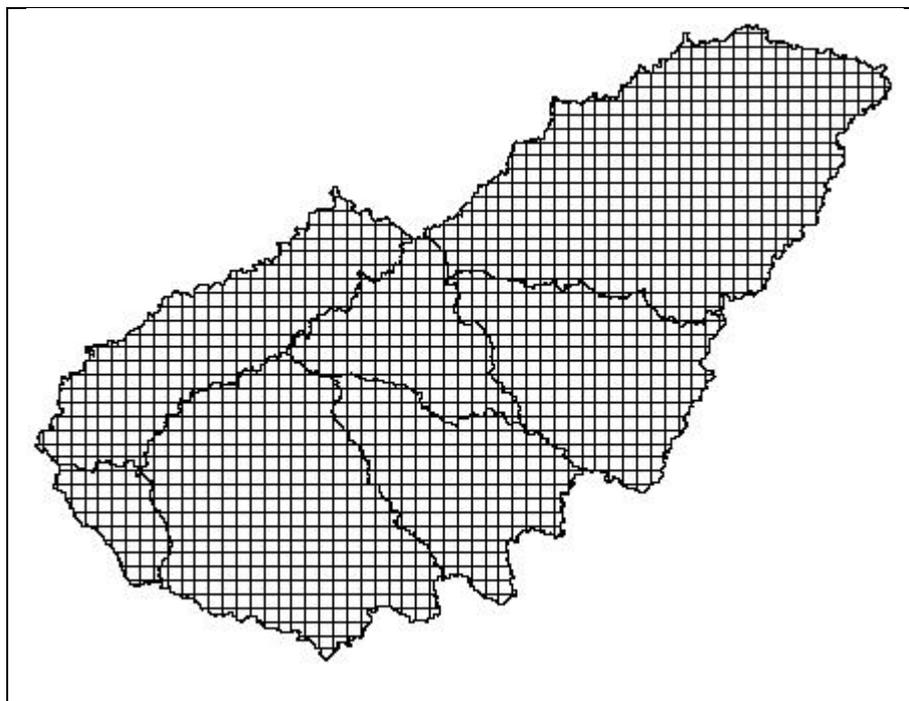


Figura A7- 1: Grid Cell Intersect Layer

En el mismo Data Frame³ se adiciona el mapa distribuido del parámetro o variable de interés (CN o precipitación) y se computa el valor promedio de la misma en el área de cada celda mediante la herramienta *Zonal Statistics as Table* (*Spatial Analysis* → *Zonal* → *Zonal Statistics as Table*). El resultado es una tabla con los estadísticos de cada celda, el campo identificado como *mean* se une a la tabla del layer *GridCellIntersect* con el comando *Join_Field* (*Data Management Tools* → *Joins* → *Join Field*).

El procedimiento se repite para cada uno de los mapas distribuidos de información. Es conveniente renombrar los campos añadidos a la tabla del layer *GridCellIntersect* para una fácil identificación ya que por defecto conservan la etiqueta *mean*. En Figura A7- 2 se presenta a modo de ejemplo el aspecto de la tabla y los campos añadidos.

³ Data Frame: carpeta en la tabla de contenidos de ArcGIS donde se organizan los layers

Anexos

GridCellIntersect48																	
OBJE	Shape *	Drain1	Name	MOD AREA	FLOWLENG	CELL Ar	CELL ID	CELL X	CELL Y	T08	T16	T24	T32	T40	T48	T56	CN 2005
1	Polygon	13	W130	0.000356	0	4000000	1031	2788	3279	48.6	68.1	60.2	3.84	7.74	8.06	0.95	75.7
2	Polygon	13	W130	2.139085	64.374473	4000000	1080	2789	3279	46.4	65.5	60.4	3.85	7.76	8.59	1.01	75.31
3	Polygon	13	W130	0.155119	63.862391	4000000	1129	2790	3279	46.4	65.4	60.7	3.86	7.77	8.82	1.04	74.92
4	Polygon	13	W130	0.764397	63.711375	4000000	983	2787	3280	49.4	69.2	59.7	3.82	7.69	7.72	0.91	76.46
5	Polygon	13	W130	2.362642	62.206262	4000000	1032	2788	3280	48.6	68.1	60.2	3.84	7.74	8.06	0.95	75.7
6	Polygon	13	W130	3.985585	62.394773	4000000	1081	2789	3280	47.8	67.1	60.6	3.85	7.77	8.47	1	76.93
7	Polygon	13	W130	2.890695	62.608148	4000000	1130	2790	3280	47.3	66.5	61.0	3.87	7.79	8.93	1.06	75.92
8	Polygon	13	W130	1.065855	63.724254	4000000	1179	2791	3280	46.8	65.9	61.3	3.88	7.8	9.43	1.12	74.96
9	Polygon	13	W130	0.032296	63.541238	4000000	1228	2792	3280	46.5	65.5	61.6	3.88	7.81	9.89	1.17	73
10	Polygon	13	W130	0.013219	32.607676	4000000	788	2783	3281	53.1	74.2	55.7	3.59	7.19	7.75	0.91	75
11	Polygon	13	W130	0.267095	57.675051	4000000	837	2784	3281	52.6	73.4	57.2	3.68	7.39	7.39	0.87	75
12	Polygon	13	W130	1.991572	57.704742	4000000	886	2785	3281	52.1	72.8	57.8	3.71	7.47	7.31	0.86	76.46
13	Polygon	13	W130	3.058018	58.728988	4000000	935	2786	3281	51.4	71.9	58.7	3.76	7.58	7.3	0.86	75.25
14	Polygon	13	W130	3.281234	61.524172	4000000	984	2787	3281	50.8	71.0	59.5	3.8	7.67	7.49	0.88	75.22

Valores de precipitación
en cada celda en intervalos
de 8 horas

CN

Figura A7- 2: Tabla del Layer GridCellIntersect con los valores de precipitación y CN en celdas

2) GENERAR ARCHIVOS EN FORMATO ASCII

Los archivos ASCII se generan a partir de cada uno de los campos de precipitación y CN de la tabla del Layer *GridCellIntersect*. Para realizar esta tarea HEC-GeoHMS dispone de una herramienta denominada *Generate ASCII Grids (Utility → Generate ASCII Grids)*, para su aplicación el atributo del campo para el cual se quiere crear el archivo ASCII debe tener el nombre apropiado de acuerdo a los permitidos en HEC-GeoHMS, para el CN la etiqueta del campo debe ser *BasinCN*, para las precipitaciones no está contemplado. En función de este requerimiento se procede de la siguiente manera:

- En la tabla del Layer GridCellIntersect se crea un campo con el nombre BasinCN y se copian en él los valores de la columna de CN añadida en el paso anterior. Se corre el comando *Generate ASCII Grids* indicando que el parámetro es Curve Number. En el directorio del proyecto se graba automáticamente un archivo ASCII denominado por defecto CNGrid.asc, éste debe renombrarse para evitar que se sobrescriba en las siguientes aplicaciones.

- Para las precipitaciones, considerando que no hay una etiqueta de campo reservada en HEC-GeoHMS pero este tipo de datos, se procede de igual manera que para el CN. Los datos del precipitación para cada intervalo se copian en el campo *BasinCN* y se corre el comando *Generate ASCII Grids* indicando, de manera “engañosa” aunque válida al solo efecto de aplicar la herramienta, que el parámetro es el *Curve Number*. En el directorio del proyecto se graba un nuevo archivo con el nombre *CNGrid.asc* que debe renombrarse. Este procedimiento se repite para las precipitaciones de cada intervalo de tiempo.

Los archivos ASCII que se generan constan de un encabezado de seis líneas seguido de una matriz de valores trazada como una imagen de la grilla modelada. Las seis líneas del encabezado se indican en Figura A7- 3.

NCOLS	Número de columnas de la grilla
NROWS	Número de filas de la grilla
XLLCORNER	Coordenada X de la esquina inferior izquierda de la grilla
YLLCORNER	Coordenada Y de la esquina inferior izquierda de la grilla
CELLSIZE	Tamaño de las celdas
NODATA_VALUE	Valor que indica celdas nulas (por defecto es -9999)

Figura A7- 3: Líneas encabezado archivos ASCII

3) CONVERTIR LOS ARCHIVOS ASCII AL FORMATO DSS

Los archivos ASCII generados en la etapa anterior deben ser convertidos al formato DSS compatible con HEC-HMS. La herramienta que se aplica es el ejecutable *asc2dssGrid.exe* que se obtiene mediante solicitud al USACE. Este programa se ejecuta desde un archivo batch (extensión bat) que debe ser escrito con la codificación indicada en Figura A7- 4.

```
asc2dssGrid.exe input=X1 dss=X2 DUNITS=X3 path=X4
```

Figura A7- 4: Formato archivo batch

Donde X1 a X4 son los argumentos con la siguiente información:

X1: nombre del archivo ASCII a convertir

X2: nombre del archivo de salida de formato DSS

X3: unidad del dato

X4: ruta completa del DSS

Los argumentos X3 y X4 deben estar de acuerdo a las convenciones especificadas en el manual del sistema de almacenamiento de datos de HEC (CEIWR-HEC, 2009). El argumento X3 es opcional y si está ausente se asume por defecto que la unidad del dato es milímetro.

En el caso de las precipitaciones discretizadas en intervalos de tiempo, el archivo batch debe contener una línea de comando para cada intervalo.

A modo de ejemplo se presenta en Figura A7- 5 el archivo batch generado en esta tesis para convertir la grilla de CN en ASCII a formato DSS y en Figura A7- 6 el archivo para los datos de precipitación.

Anexos

```
asc2dssGrid.exe input=CN.asc dss=CN.dss DUNITS=undef path=/shg/Feliciano/"curvenumber"///mapa/
```

Figura A7- 5: Ejemplo archivo batch para convertir grilla CN en formato ASCII a DSS

```
asc2dssGrid.exe input=T08.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/11mar2005:1700/12mar2005:0100/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T16.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/12mar2005:0100/12mar2005:0900/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T24.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/12mar2005:0900/12mar2005:1700/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T32.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/12mar2005:1700/13mar2005:0100/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T40.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/13mar2005:0100/13mar2005:0900/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T48.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/13mar2005:0900/13mar2005:1700/mapa/
asc2dssGrid.exe input=T56.asc dss=P2K.dss path=/shg/Feliciano/"precipitation"/13mar2005:1700/14mar2005:0100/mapa/
```

Figura A7- 6: Ejemplo archivo batch para convertir grilla precipitación en formato ASCII a DSS

SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO

En Figura A7- 7 se sintetiza el procedimiento para la creación de los archivos en grilla en formato DSS para HEC-HMS.

Anexos

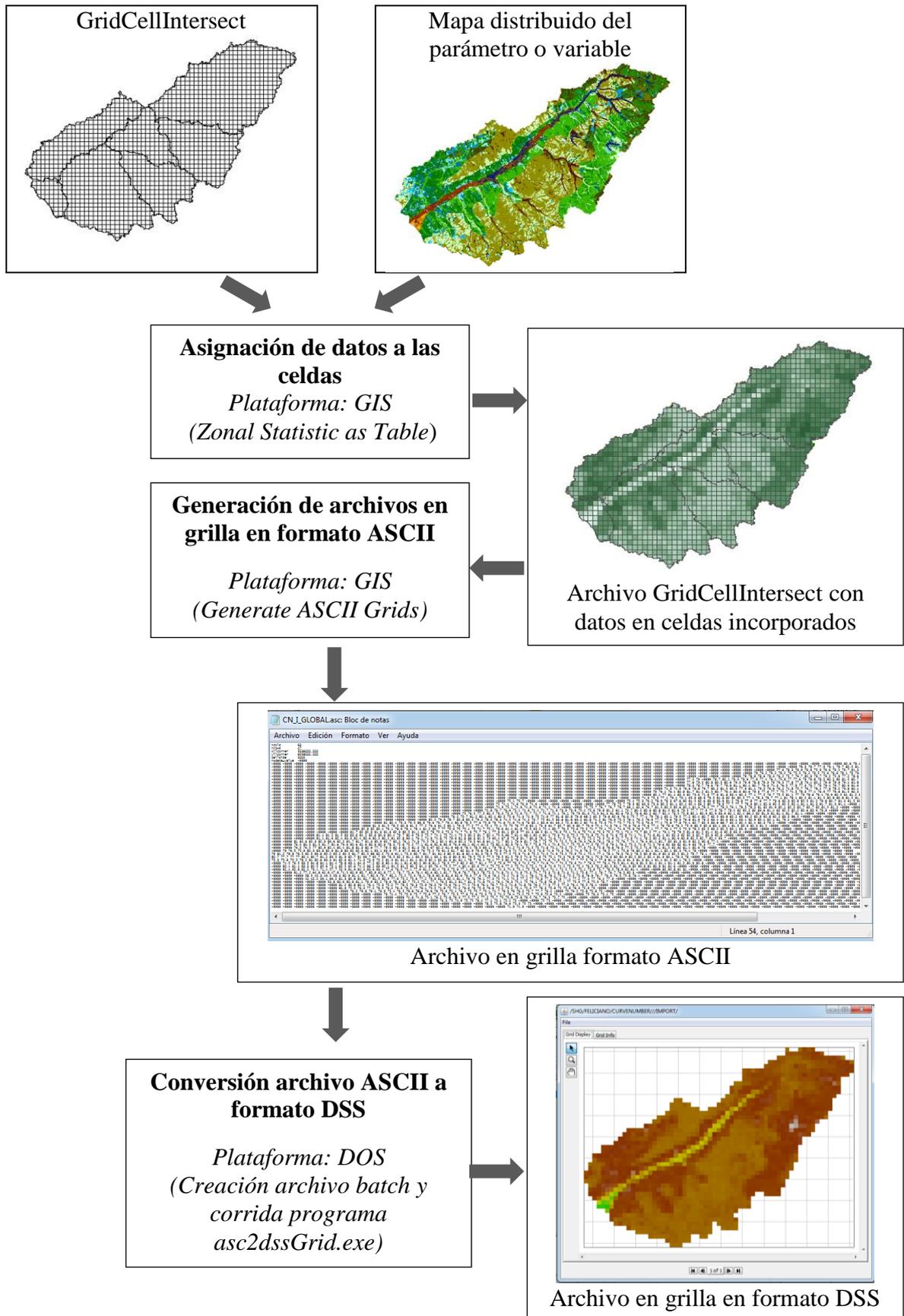


Figura A7- 7: Esquema procedimiento generación archivos en grilla