

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCIÓN
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACION Y EXTENSION

INFORME FINAL DE PROYECTO

Sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en el sistema de cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote en Dulce Nombre de Cartago

Investigador Responsable y Coordinación:

Ing. Maikel Méndez M. MSc.
CIVCO/ Escuela de Ingeniería en Construcción
Instituto Tecnológico de Costa Rica
mamendez@itcr.ac.cr

Junio de 2012

RESUMEN

El modelo hidrológico SWMM fue aplicado en dos cuencas experimentales correspondientes al río Toyogres y la quebrada Zopilote en Cartago, Costa Rica. El software PEST fue utilizado en la calibración/análisis de sensibilidad del modelo. La parameterización inicial se fundamentó en información espacial de alta resolución. En el proceso de calibración/validación se utilizaron 13 tormentas registradas entre Septiembre y Noviembre de 2011. Los resultados muestran una eficiencia NS media de 0.85 ± 0.07 en calibración y 0.87 ± 0.04 en validación para la cuenca del Toyogres; mientras que para el Zopilote, estos valores alcanzan 0.80 ± 0.04 y 0.77 ± 0.01 respectivamente.

Los coeficientes de rugosidad en flujo superficial sobre el área impermeable (n_{imp}), flujo superficial sobre el área permeable (n_{per}) y tránsito hidráulico (n_{cha}), fueron los parámetros más sensitivos. Su comportamiento resultó ser parcialmente dependiente a la intensidad y volumen total de precipitación en relación a los usos y coberturas. Igualmente, existe una profunda dependencia con respecto al estado de humedad antecedente del suelo y los estados de flujo hidráulico, tanto a nivel de superficie como de red de drenaje.

El análisis de tormentas indica que los parámetros y sus sensibilidades cambian en relación a la tipología de cada tormenta y con el régimen de precipitación del año hidrológico. Esto indica que no existe un único set óptimo de parámetros que se adapte satisfactoriamente a todas las condiciones. Aun cuando los coeficientes de variación de los parámetros son relativamente altos, SWMM demostró ser lo suficientemente flexible como para ser utilizado en condiciones donde no existen datos de calibración/validación.

Palabras Clave: GIS, Hidrología, Modelación, PEST, SWMM.

TABLA DE CONTENIDOS

Capítulo	Página
1_INTRODUCCIÓN	1
2_METODOLOGIA	6
Área de Estudio	6
Generación de Modelos de Elevación Digital (DEMs)	7
Parámetros Cartográficos	7
Orientación Externa	8
Aerotriangulación Analítica Digital (AAD)	10
Orientación Interna	11
Control de Calidad	15
Hidroprocesamiento	15
Descripción del Modelo SWMM	17
Escorrentía Superficial	18
Tránsito Hidráulico	20
Condiciones de Frontera	21
Pérdidas por Infiltración	21
Calibración y Análisis de Sensibilidad	25
Modelo de cambio temporal de cobertura	28
3_CONFIGURACION DEL MODELO	33
Datos de Entrada	33
Configuración de SWMM	36
Configuración de PEST	36
4_RESULTADOS Y ANALISIS	38
Generación de Modelos de Elevación Digital (DEMs)	38
Hidroprocesamiento	40
Hidrogramas Observados	44
Calibración de tormentas	46
Variabilidad de los parámetros	54
Análisis de sensibilidad y correlaciones	58
Proyección Temporal del cambio de Cobertura	65
Cambio temporal de usos del suelo para el periodo 1997- 2011	65
Cadenas de Markov	66
Aplicación de Autómatas Celulares	67
Coeficiente de escorrentía superficial	69

Evaluación de la capacidad hidráulica.....	72
5_CONCLUSIONES	74
6_RECOMENDACIONES.....	76
7_REFERENCIAS.....	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Características del sistema de proyección CRTM05	7
Cuadro 2. Puntos de control (GCPs) para el área de estudio	10
Cuadro 3. Clasificación de usos en el modelo SWMM	24
Cuadro 4. Factores de peso y objetivos utilizados en el modelo Markov-AC...	31
Cuadro 5. Grupos de parámetros elegidos para la calibración con PEST	37
Cuadro 6. Control de calidad de los DEMs generados en WorldView-1	40
Cuadro 7. Parámetros desagregados para la cuenca del río Toyogres	43
Cuadro 8. Parámetros desagregados para la cuenca de quebrada Zopilote ...	44
Cuadro 10. Estadísticas de eficiencia en calibración río Toyogres	46
Cuadro 11. Estadísticas de eficiencia en calibración quebrada Zopilote.....	46
Cuadro 12. Estadísticas de eficiencia en validación río Toyogres.....	53
Cuadro 13. Estadísticas de eficiencia en validación quebrada Zopilote	53
Cuadro 14. Variabilidad de parámetros calibrados río Toyogres.....	56
Cuadro 15. Variabilidad de parámetros calibrados quebrada Zopilote	56
Cuadro 16. Variabilidad de sensibilidad paramétrica río Toyogres	62
Cuadro 17. Variabilidad de sensibilidad paramétrica quebrada Zopilote.....	62
Cuadro 18. Precipitación promedio en 24 horas para el área de estudio	63
Cuadro 19. Evolución temporal de los usos del suelo	66
Cuadro 20. Probabilidades de transición cadenas de Markov.....	67
Cuadro 21. Número de píxeles a cambiar entre los usos del suelo.....	67
Cuadro 22. Proyección de la evolución temporal 2011-2025	68

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Localización del área de estudio.....	6
Figura 2. Distribución temporal de la precipitación estación Linda-Vista.....	7
Figura 3. Ubicación de los GCPs sobre el área de terreno	8
Figura 4. Ubicación externa de dos GCPs para las imágenes CARTA-2005.....	9
Figura 5. Resultados del ajuste RMSE con base al proceso ADD	12
Figura 6. Bloque final de imágenes CARTA-2005 proceso de ADD.....	12
Figura 7. Puntos fiduciales ligados a la orientación interna.....	13
Figura 8. Nube de puntos generada por ERDAS-LPS.....	14
Figura 9. Diagrama de flujo para la generación de DEMs	14
Figura 10. Diagrama de flujo ligado a las funciones de hidroprocesamiento ...	16
Figura 11. Diagrama esquemático del modelo SWMM	11
Figura 12. Componentes del balance de masas de SWMM.....	19
Figura 13. Corte transversal de la sección T24 río Toyogres	25
Figura 14. Diagrama de flujo ligado a la conexión de PEST con SWMM.....	27
Figura 15. Comparación entre ortofotografía TERRA de 1997	30
Figura 16. Comparación entre imágenes infrarroja WorlView-2 de 2011	30
Figura 17. Mapas booleanos y continuos modelo Markov-CA	32
Figura 18. Ubicación de las estaciones meteorológicas y sensores de nivel ...	34
Figura 19. Interface de lectura de datos de las estaciones meteorológicas	34
Figura 20. Serie temporal registrada de los sensores río Toyogres	35
Figura 21. Comparación cualitativa entre contornos	38
Figura 22. WorldView-1 DEM a 2 m y mapa de callejo-PRUGAM	40
Figura 23. Áreas tributarias cuenca del río Toyogres	42
Figura 24. Delimitación, red de drenaje, subcuencas	43
Figura 25. Correlación entre niveles y caudales río Toyogres.....	45
Figura 26. Correlación entre niveles y caudales quebrada Zopilote.....	45
Figura 27. Intensidades máximas y volúmenes de precipitación.....	47
Figura 28. Correlación entre la eficiencia NS, intensidad y volumen	48
Figura 29. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados T9...	49
Figura 30. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados T10.	50
Figura 31. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados T6...	52
Figura 32. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados T7...	52
Figura 33. Variabilidad de los hidrogramas diferentes resoluciones	54
Figura 34. Variabilidad de parámetros calibrados río Toyogres	55
Figura 35. Variabilidad de parámetros calibrados quebrada Zopilote	55
Figura 36. Variabilidad del tiempo pico efectivo e intensidad de precipitación.	58
Figura 37. Comparación entre los grupos de parámetros distribuidos	60
Figura 38. Variabilidad de la sensibilidad paramétrica río Toyogres	60
Figura 39. Variabilidad de la sensibilidad paramétrica quebrada Zopilote	61
Figura 40. Parámetros de SWMM vrs intensidad río Toyogres	63
Figura 41. Parámetros de SWMM vrs intensidad quebrada Zopilote	64
Figura 42. Parámetros de SWMM vrs volumen río Toyogres.....	64
Figura 43. Parámetros de SWMM vrs volumen quebrada Zopilote	65

Figura 44. Cambio temporal del uso del suelo propuesto para 2025	68
Figura 45. Evolución temporal de los usos del suelo.....	69
Figura 46. Comportamiento del parámetro pimp para el periodo 2011-2025 ...	70
Figura 47. Comparación de hidrogramas 2011-2025 río Toyogres	71
Figura 48. Comparación de hidrogramas 2011-2025 quebrada Zopilote	71
Figura 49. Hietogramas sintéticos de tormentas quebrada Zopilote	72
Figura 50. Comportamiento hidráulico de los nudos sobre la red de drenaje ..	73

LISTA DE Abreviaciones

Abreviación:

AAD = Aerotriangulación Analítica Digital

AC = Automatas Celulares

CARTA= Costa Rica Airborne Research And Technology Applications

CN = Curve Number

COMER = Comercial

CROPS = Cultivos

CRTM05 = Costa Rica Transversal de Mercator de 2005

DEM =Digital Elevation Model

dimp = Lámina de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable

dper = Lámina de almacenamiento en depresión sobre el área permeable

EMC = Evaluación Multicriterio

Ep = Error Pico Relativo

Ept = Error Relativo al Tiempo Pico

Ev = Error Volumétrico Relativo

GCP = Ground Control Points

GIS= Geographic Information Systems

GML = Gauss Marquardt Levenberg

GPS = Global Positioning System

HDRES = High Density Residential

IDF = Intensidad Duración Frecuencia

IF = Indice de Forma

IFA_ANTRO = IFA de antropoptitud

IFA_BIO = IFA de biooptitud

IFA_EDA = IFA de edafooptitud

IFA_GEO_RES = IFA de geooptitud

IFAs = Índices de Fragilidad Ambiental

IMN =Instituto Meteorológico Nacional

INDUS = Industrial

LDRES = Low Density Residential

MDRES = Medium Density Residential

MSSCUS = Modelos de Simulación Simultánea de Cambio de Uso / Cobertura de Suelo

ncha = Coeficientes de rugosidad de Manning para el tránsito hidráulico

nimp = Coeficientes de rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable

nper = Coeficientes de rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable

NS = Nash Sutcliffe

P = Caudal Pico

PEST = Parameter Estimation

pimp = Porcentaje de área impermeable

PROTEC = Protección

PROTECCON = Restricción de expansión en zonas de protección

PRUGRAM = Programa Regional Urbano del Gran Area Metropolitana

Pt = Tiempo Pico
RGB = Red Green Blue
RMSE =Root Mean Square Error
ROADDIST = Distancia a red de transporte
SCS = Soil Conservation Service
SMA = Soil Moisture Accounting
SWMM = Storm Water Management Model
TIN = Triangular Irregular Network
TOWNDIST = Distancia a centro de población
TP = Tie Point
TRANS = Transporte
USGS = United States Geological Survey
V = Volumen Escurrido
WATERCON = Restricción de expansión en cuerpos de agua
WGS-84 = World Geodetic Survey 1984
widt = Ancho característico del plano del modelo cinemático
WV-1 = WorldView I
WV-2 = WorldView II

1_INTRODUCCIÓN

Las grandes áreas metropolitanas se caracterizan por un continuo incremento en su nivel de impermeabilidad, causado principalmente por el desarrollo urbanístico. Con el incremento de la impermeabilidad, incrementan igualmente los volúmenes de escorrentía, los caudales pico y la concentración de contaminantes en las redes de drenajes, lo cual acarrea consecuencias negativas para los sistemas naturales (Barco *et al.* 2008).

Los modelos hidrológicos distribuidos de precipitación-escorrentía, físicamente basados, representan una herramienta poderosa en el análisis detallado, simulación y predicción del comportamiento de los sistemas urbanos de drenaje, amparados principalmente en información espacial proveniente de Sistemas de Información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés) (Boyko & Treebushny 2006). Modelos de este tipo son aplicados principalmente al estudio de eventos de tormentas, con lo que es posible analizar el impacto hidrológico que dichas tormentas tienen sobre procesos tales como inundaciones, transporte de sedimentos, transporte de contaminantes e hidráulica de alcantarillados (Hsu *et al.* 2000; Marcel van der Perk 2003; Veihe *et al.* 2001).

La mayoría de los modelos hidrológicos de tormentas, representan a un sistema hidrológico a través de rutinas que describen los mecanismos de precipitación-escorrentía, pérdidas por infiltración y tránsito hidráulico (Huber & Dickinson 1988; Jain *et al.* 2004). Dado que los modelos no son más que aproximaciones de sistemas reales, la confiabilidad sobre sus predicciones dependerá de que tan bien haya sido definida la estructura matemática del mismo y de que tan bien haya sido parameterizado (Hogue *et al.* 2006). En cuencas no instrumentadas, estos modelos son comúnmente parameterizados mediante la ejecución de pruebas de campo (e.g capacidad de infiltración, textura, cobertura, uso de suelo, etc), el procesamiento de capas de información geográfica y la utilización tablas de referencia típicas encontradas en la literatura (Ritter 1992).

Para que un modelo se considere confiable, éste debe ser capaz de predecir el comportamiento del sistema real bajo una amplia gama de condiciones sobre un periodo extendido de tiempo. Lo anterior, puede lograrse mediante la calibración del modelo. La calibración de un modelo se alcanza mediante la optimización de los parámetros físicos, numéricos y conceptuales envueltos en la estructura matemática del modelo; comparando cualitativa y cuantitativamente la respuesta del modelo contra una serie de mediciones de campo u observaciones (Gupta & Sorooshian 1985). En el caso de hidrología, las observaciones, mediante los registros temporales de flujo tanto en cauces abiertos como en redes de alcantarillados, representan la mayor fuente de información sobre el grado de respuesta de la cuenca ante un determinado evento de precipitación.

En los modelos hidrológicos de tormentas, los investigadores se centran en el análisis de los hidrogramas producidos por tormentas más que en las series temporales completas. Por esta razón, el flujo base queda generalmente de lado (Lee & Risley

2002). Los modelos distribuidos, cuyos parámetros poseen un inherente sentido físico, representan el centro de investigación de la modelación hidrológica, en el tanto que estos modelos son supuestamente menos dependientes a procesos de calibración, lo que los hace particularmente útiles en cuencas no instrumentadas. Además, la interpretatividad de parámetros físicos arroja una idea clara del comportamiento hidrológico de una cuenca (Maneta *et al.* 2007).

No obstante, se ha encontrado dependencia en los parámetros de varios modelos hidrológicos con respecto al grado de humedad antecedente del suelo, así como de la intensidad y distribución de las tormentas (Ceballos & Schnabel 1998). Esto incluye parámetros relacionados a los mecanismos de infiltración y tránsito hidráulico. En este último caso, la rugosidad hidráulica asociada a los diversos usos y tipos de cobertura del suelo, controla los mecanismos físicos ligados a la generación y tránsito de la escorrentía superficial, lo cual a su vez sugiere una dependencia a la intensidad y distribución de la tormenta.

Diversos estudios experimentales y de campo, han relacionado la rugosidad de los materiales a las características propias del estado de flujo a través de indicadores como el tirante hidráulico, la velocidad y los números de Reynolds y Froude (Weltz *et al.* 1992; Wu *et al.* 1999; Gaur & Mathur 2003; Kalyanapu *et al.* 2009). Tales estudios sugieren que estos parámetros no son una propiedad de la superficie sino una propiedad de la interacción entre la superficie y el flujo. Dada la sensibilidad de los modelos hidrológicos a estos parámetros, la incorporación de su dependencia podría mejorar considerablemente la calidad de las predicciones (Jain *et al.* 2004).

Debe de tenerse en cuenta que mediante el estudio de hidrogramas reales, la escorrentía en áreas urbanas es predominantemente causada por tormentas y la importancia del flujo base es considerada como limitada ante fenómenos de escorrentía Hortoniana (Elliott & Trowsdale 2007). No obstante, es sabido que durante tormentas de alta intensidad, la intensidad del evento sobrepasa con creces la capacidad de infiltración del suelo, con lo que se llega a producir escorrentía independientemente del nivel de humedad antecedente del suelo. Más allá de la indiscutible variabilidad espacial de los parámetros, la existencia de una variación temporal en su magnitud, podría indicar en qué forma los parámetros de un determinado modelo tienen mayor o menor importancia relativa en la producción de la escorrentía y como los parámetros se relacionan entre sí, de acuerdo a las características de los diferentes eventos de precipitación (Maneta *et al.* 2007). Tras el proceso inverso de calibración de un modelo, el set óptimo de parámetros define el mínimo absoluto del espacio paramétrico del modelo (Gallagher & Doherty 2007). Un aspecto clave, sería determinar si éste mínimo absoluto varía de acuerdo a los diversos sets de óptimos parámetros de forma predecible, en virtud de las condiciones de frontera y el estado propio del sistema en un determinado momento. Esto indicaría que un único set de parámetros óptimos sería incapaz de caracterizar una cuenca ya que la geometría del espacio paramétrico podría ser sensitiva a las fuerzas motrices que dominan al modelo. Por otro lado, uno de los mayores problemas de utilizar modelos hidrológicos de tormentas con carácter distribuido en áreas urbanas se centra en cómo construir el modelo de forma rápida y precisa. La mayoría de los modelos de precipitación-escorrentía actuales; al ser de

carácter distribuido, operan como una colección de áreas tributarias o subcuencas, las cuales contribuyen en flujo y masa a la red de drenaje como un todo (Yu *et al.* 2001; Dongquan *et al.* 2009). Es evidente por lo tanto, que para la aplicación de un modelo de precipitación-escorrentía sobre un área urbana, se requiere de un alto nivel de discretización espacial. La escorrentía en áreas urbanas es un proceso complejo y se ve afectado por atributos de forma, pendiente, acumulación de flujo y cobertura propios de la cuenca. Dichos atributos claramente tienen una fuerte influencia sobre los tiempos de concentración y por ende sobre la confiabilidad de las predicciones del modelo. Tradicionalmente, el esquema de discretización en áreas urbanas se ha hecho de forma manual, utilizando hojas cartográficas, fotografías aéreas y planos constructivos (Yu *et al.* 2001). Este proceso, además de tedioso, produce un sinnúmero de inconsistencias e irregularidades que atentan con la correcta caracterización del modelo. Los sistemas GIS poseen funciones de análisis espacial muy robustas, las cuales pueden ser utilizadas en la construcción de un modelo con características espaciales. La aplicación de sistemas GIS en modelos hidrológicos urbanos se ha convertido en una práctica usual en los últimos años. Las funciones de análisis espacial típicas incluyen almacenamiento, manipulación, análisis y correlación de información espacial, principalmente proveniente de fuentes de teledetección o sensores remotos (Seth *et al.* 2006).

Los desarrollos alcanzados con la tecnología GIS, lo cual incluye modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés), mapas de uso y cobertura, suelos y textura, curvas de nivel, ortofotografías, acumulación y pendiente de una red de drenaje, pueden ser utilizados en la extracción automática de parámetros característicos de un modelo (Forte *et al.* 2006). Sin embargo, la densidad y cantidad de datos potencialmente extraíbles es abrumadora, lo cual podría representar un espacio paramétrico altamente complejo y redundante. Al mismo tiempo, imparte un costo elevado sobre los recursos computacionales necesarios para resolver un problema matemático tan complejo (Du *et al.* 2007). En un sistema hidrológico real, pueden existir cientos de incógnitas y tan solo una cantidad relativamente baja de observaciones, principalmente hidrogramas de registro. Pueden haber entonces, muchas soluciones que proporcionen resultados igualmente buenos en términos de las funciones objetivos seleccionados para evaluar el modelo, arribando a una situación de “equifinalidad” (Duan *et al.* 1992; Fang & Ball 2007). Esta ambigüedad acarrea un serio impacto sobre la incertidumbre de los parámetros que consecuentemente limita la aplicabilidad del modelo. Con el objeto de disminuir el número de incógnitas y mejorar la confiabilidad sobre las predicciones del modelo, es necesario restringir el espacio paramétrico (Beven & Binley 1992). Una acción obvia en la restricción de un modelo hidrológico es la discretización de la cuenca de áreas tributarias o subcuencas que compartan características y condiciones similares tales como cobertura, pendiente, dirección de flujo y área climática (Park *et al.* 2008). Con esto se consigue la adopción de modelos más sencillos o “parsimoniosos” que requieren un menor grado de parameterización, menor cantidad de parámetros ajustables, menores recursos computacionales, menor compensación de errores y mayor confiabilidad (Harremoës & Madsen 1999; Becker & Braun 1999). Por otro lado, se reduce el grado de auto-correlación y co-dependencia entre los parámetros (Mannina & Viviani 2010). Esto es particularmente práctico en materia de hidrología, donde la calibración depende

esencialmente de un pequeño grupo de observaciones de flujo en puntos clave de la cuenca. Aun cuando existen diversas técnicas orientadas a disminuir el espacio paramétrico y las fuentes de incertidumbre de un modelo, la típica suposición que los parámetros permanecen constantes con el tiempo es aplicable únicamente a ciertas variables de estado (Moradkhani & Sorooshian 2008). Consecuentemente, es necesario establecer un procedimiento que puede proporcionar estimaciones confiables sobre la variación de los parámetros a través de tiempo.

El cambio temporal del uso de suelo, acarrea importantes transformaciones hidrológicas, incluyendo mayores caudales picos y menores tiempos de concentración, particularmente cuando se presentan tormentas de alta intensidad. Esto se traduce en un mayor riesgo de inundación, desbordamiento de cauces, erosión y difusión de contaminantes principalmente en áreas urbanas (Goudie 1990; Weng 2001). Dada la naturaleza espacialmente distribuida de los modelos hidrológicos, se requiere de planteamientos capaces de tomar en cuenta estas variables y que sea capaz a su vez de tomar ventaja de los avances en materia de sistemas GIS. En este contexto, es indispensable avanzar en el estudio y pronóstico que la evolución temporal de ciertos parámetros pueda tener sobre los coeficientes de escorrentía superficial en áreas urbanas, considerando a su vez los cambios temporales sobre el uso del suelo.

En este sentido, actualmente se cuenta con diversos modelos temporales de cambio de uso, denominados Modelos de Simulación Simultánea de Cambio de Uso / Cobertura de Suelo o MSSCUS (Henríquez *et al.* 2006), los cuales representan una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a aspectos tales como:

- Explorar los mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto.
- Proyectar en el tiempo, los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo.
- Evaluar la influencia de la aplicación de políticas y esquemas de manejo sobre el ordenamiento del territorio, el desarrollo y el uso del suelo.

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros tales como la extensión actual de las áreas urbanas, las principales vías de comunicación, la distancia a los centros de población, bienes e insumos, las condiciones topográficas y la existencia de terrenos en situación especial (e.g. áreas de protección).

El objetivo principal del modelo es la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado. Uno de los modelos de cambio de uso del suelo con más investigación y desarrollo en los últimos años es el basado en las técnicas estocásticas de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou & Liebhold 1995; Pontius & Malanson 2005). Este modelo toma en consideración algoritmos de regresión y transición espacial. Los algoritmos de regresión establecen las relaciones entre los diversos objetivos o usos del suelo y las probabilidades de cambio de ese uso, lo cual es tradicionalmente modelado como una función de decaimiento, donde la influencia decrece con el incremento de la distancia. Lo anterior, permite pronosticar un determinado cambio de uso del suelo.

Los valores de las variables y los objetivos de cambio de uso del suelo son comúnmente cuantificados a partir de datos históricos obtenidos de imágenes satelitales o fotografías aéreas. Por otro lado, los algoritmos de transición espacial asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición o cambio del área de cada celda o pixel de un mapa de uso de tipo raster. Los AC incorporan reglas simples acerca de los efectos de adyacencia espacial que gobiernan la dinámica del sistema y que dan lugar a patrones de comportamientos emergentes que son usualmente más complejos que aquellos generados por simples modelos de equilibrio (Theobald & Hobbs 1998).

Es necesario entonces, establecer correlaciones claras entre el cambio temporal del uso del suelo y el impacto que los parámetros de modelos hidrológicos puedan sobre los coeficientes de escorrentía. Las inundaciones en el mundo entero impactan a más a los centros de población que cualquier otro desastre natural (World Disasters Report, 2003). En este sentido, se ha demostrado que la forma más efectiva de reducir el riesgo de pérdidas humanas en zonas propensas a inundaciones es precisamente el desarrollo de sistemas de vigilancia y monitoreo, los cuales deben estar amparados a modelos hidrológicos/hidráulicos adecuadamente calibrados y validados (Negri *et al.* 2004). No obstante, el progreso en el desarrollo de estos sistemas de monitoreo, se ha visto restringido en buena medida por la dificultad de cuantificar adecuadamente el principal factor causante de las inundaciones; la precipitación. Los flujos de precipitación varían constantemente en el espacio (escala local y regional) y el tiempo (diario, horario, sub-horario) y nuestras redes de control en tierra resultan sencillamente insuficientes para cubrir todas las zonas de interés (Hong *et al.* 2007). Por otro lado, el costo de instrumentación en cauces, a partir de lo cual se obtienen series de observaciones necesarias en la calibración de los modelos, hace imposible poder instrumentar todas y cada una de las cuencas.

El objetivo de este proyecto es implementar un sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en una cuenca experimental urbana de alta pendiente haciendo uso de un modelo hidrológico de tormentas totalmente-distribuido e información espacial de alta resolución. Los objetivos específicos se resumen en:

- Generar modelos de elevación digital del área de estudio a partir de imágenes satelitales multiespectrales estereoscópicas de alta resolución ligadas a puntos de control de tierra.
- Generar mapas de clasificación de cobertura y uso de terreno mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución.
- Desarrollar una proyección temporal de cambio de uso y cobertura de terreno de tipo urbano mediante el modelo IDRISI / CA_MARKOV.
- Instalar al menos dos estaciones de medición de flujo y dos estaciones meteorológicas en puntos selectos de las redes de drenaje.
- Ejecutar simulaciones de los modelos hidráulicos y meteorológicos con la información obtenida con el fin de validar su uso.

2_METODOLOGIA

Área de Estudio

El área de estudio se localiza al noroeste de la provincia de Cartago, Costa Rica e incluye las cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote. Ambas cuencas, con un área de 14.6 Km² drenan sus aguas en el río Agua Caliente (Figura 1). El área se extiende desde los 9.7 hasta los 10.1 grados de latitud norte y entre los 84.0 y 83.7 grados de longitud oeste. El uso del suelo contempla primordialmente áreas de cultivo y uso urbano en la parte sur. Los tipos de suelo varían de texturas arcillosas a limo-arcillosas, principalmente inceptisoles y ultisoles. La condición de terreno es abrupta con un cambio de elevación en el orden de los 980 msnl, desde las cercanías del volcán Irazú (2260 msnl) hasta el centro urbano de Cartago (1280 msnl). No existe una clara distinción entre estaciones secas o húmedas en la zona.

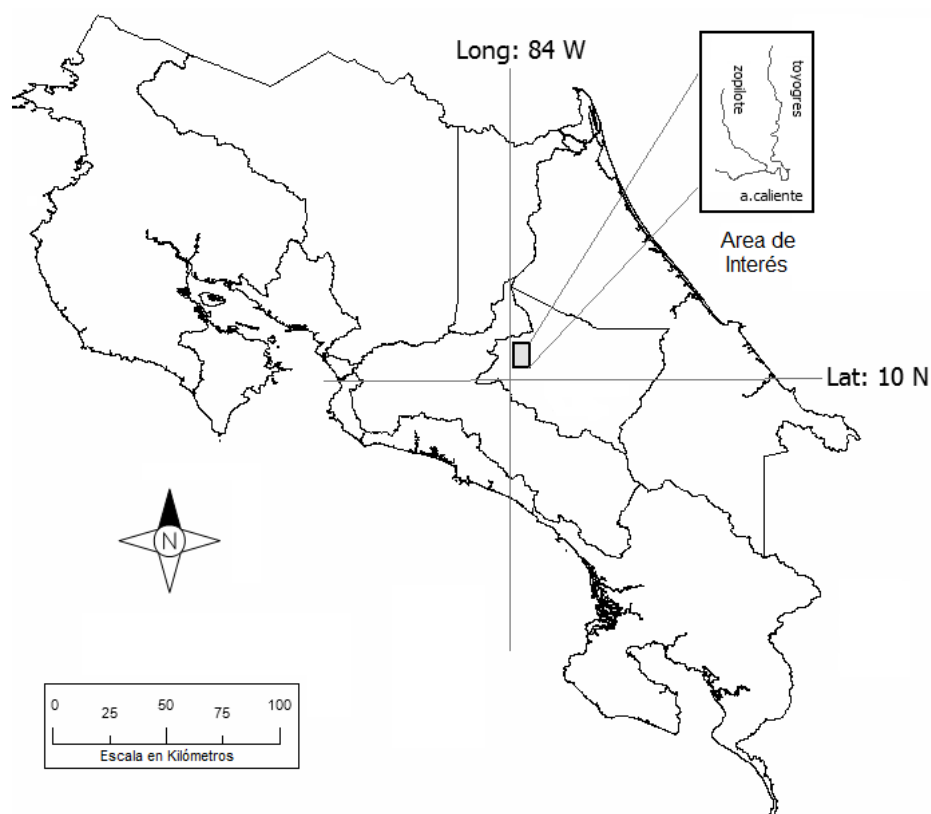


Figura 1. Localización del área de estudio en relación al territorio de Costa Rica

No obstante, existen claramente dos periodos particularmente lluviosos, uno de Mayo a Julio y otro de Septiembre a Noviembre los cuales tienen una clara influencia de actividad ciclónica en la costa caribe de Costa Rica. La Figura 2 muestra la variación temporal promedio de precipitación en la estación 73048-Linda_Vista del IMN (Retana & Villalobos 2006). La precipitación anual promedio oscila entre 1270y 1530 mm.

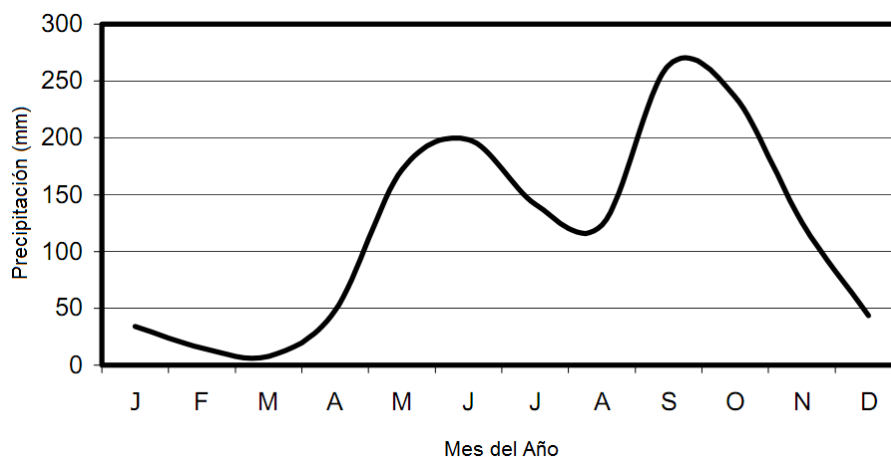


Figura 2. Distribución temporal de la precipitación para la estación Linda-Vista, Cartago. Fuente: (Retana & Villalobos 2006)

Generación de Modelos de Elevación Digital (DEMs)

Dos diferentes fuentes de información fueron utilizadas para generar los diversos modelos de elevación digital (DEMs) utilizados en éste estudio. Dichas fuentes comprenden las fotografías aéreas tomadas por la misión CARTA-2005 y un set de imágenes estereoscópicas tomadas por el satélite WorldView II.

Parámetros Cartográficos

El sistema de proyección cartográfica utilizado en este estudio corresponde al Costa Rica Transversal de Mercator, CRTM05 (Cuadro 1) definido por la Unidad Ejecutora del Catastro Nacional de Costa Rica (IGN 2008). Para la referencia vertical de los puntos, se tienen en cuenta las diferencias verticales de los puntos o elevaciones elipsoidales sobre el sistema GPS obtenidas de los ajustes de observaciones sobre el elipsoide WGS-84. A las elevaciones elipsoidales se les aplicó el modelo regional de ondulación CARIB-97, obteniendo así las elevaciones ortométricas.

Sistema Proyección	CRTM05
Esferoide	WGS84
Datum	WGS85
Meridiano central	-84
Latitud de referencia	0
Falso Este	500000
Falso Norte	0
Factor de escala	0.9999

Cuadro 1. Características del sistema de proyección CRTM05.

Orientación Externa

Un total de 42 puntos de control en terreno (GCPs por sus siglas en inglés) fueron utilizados para respaldar la orientación externa de las diferentes fuentes de información espacial (Cuadro 2). El objetivo primordial de los GCPs es establecer la relación entre el sistema de coordenadas de la proyección cartográfica (CRTM05) y el sistema de coordenadas de las imágenes (a nivel de pixel). 23 puntos fueron referidos al estudio realizado por la empresa BLOM para PRUGRAM (PRUGAM 2008), mientras que los restantes 19 puntos fueron tomados por personeros del CIVCO-ICO del ITCR (Figura 3). En ambos casos, se utilizaron dispositivos GPS diferenciales de la marca TRIMBLE modelos 5700 y R3 respectivamente. Los protocolos de tomas de datos utilizados se apegaron a las recomendaciones del fabricante, de manera tal que los GCPs fueron levantados en locaciones claramente identificables tanto en las imágenes satelitales como en las fotografías aéreas.

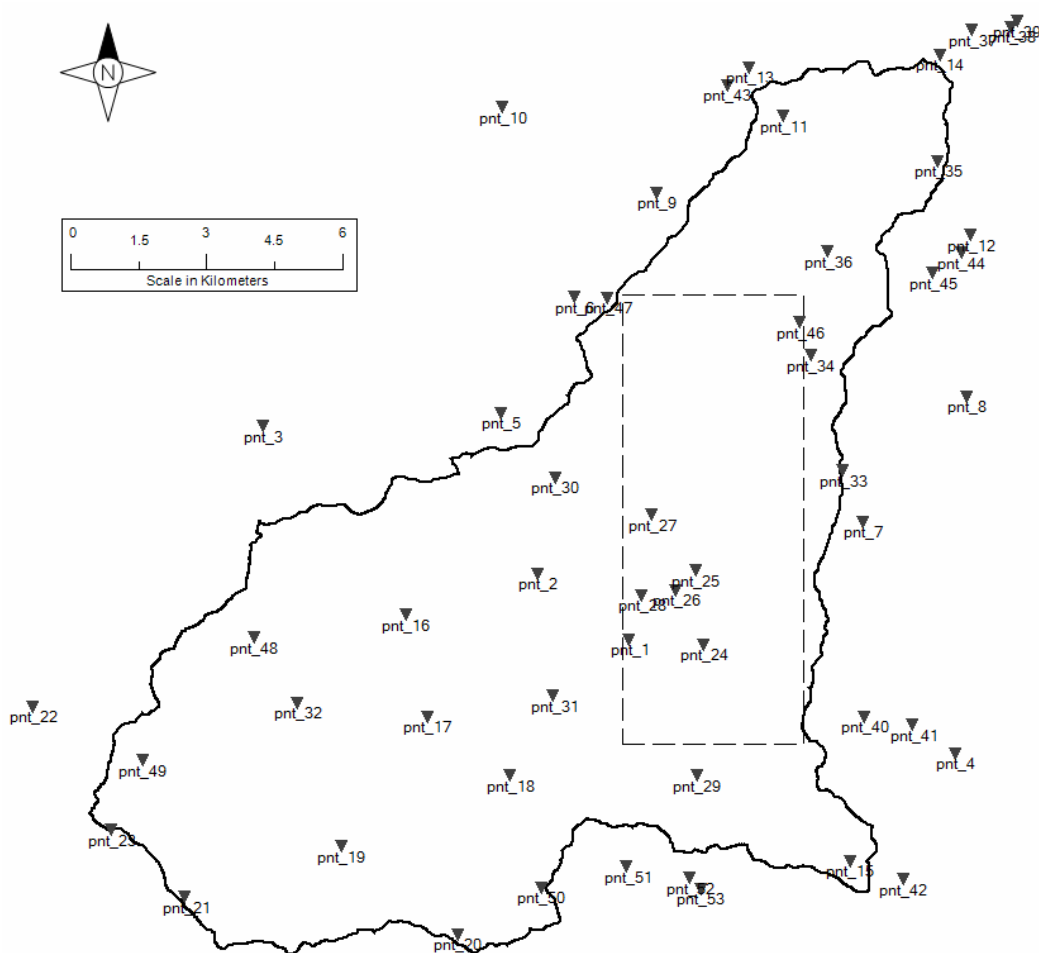


Figura 3. Ubicación de los GCPs sobre el área de terreno. La línea continua representa la delimitación de la cuenca del río Navarro mientras que la línea punteada representa la porción del área de estudio destinada al análisis de la cuenca del río Toyogres.

La Figura 4, muestra la ubicación en campo (croquis) y la ubicación en las fotografías aéreas CARTA-2005 para dos diferentes GCPs, el 084 (PRUGAM) y el 013 (ITCR). Cada toma de datos contó con una exposición del al menos 30 minutos y fueron procesados mediante el software TRIMBLE Business Center. Cada GCPs representa un punto de control total (X,Y y Z) y cuenta con su respectivo informe que respalda la calidad de cada punto. La selección de los puntos tomados por el ITCR se ejecutó pensando en la mayor cantidad de puntos por fotografía aérea. Lo anterior no aplica a las imágenes satelitales ya que se trata esencialmente de un solo bloque. Con estos equipos se consiguieron precisiones de 3 mm. + 0.5 ppm. (emc) en levantamiento estático, modalidad utilizada en todos los puntos.

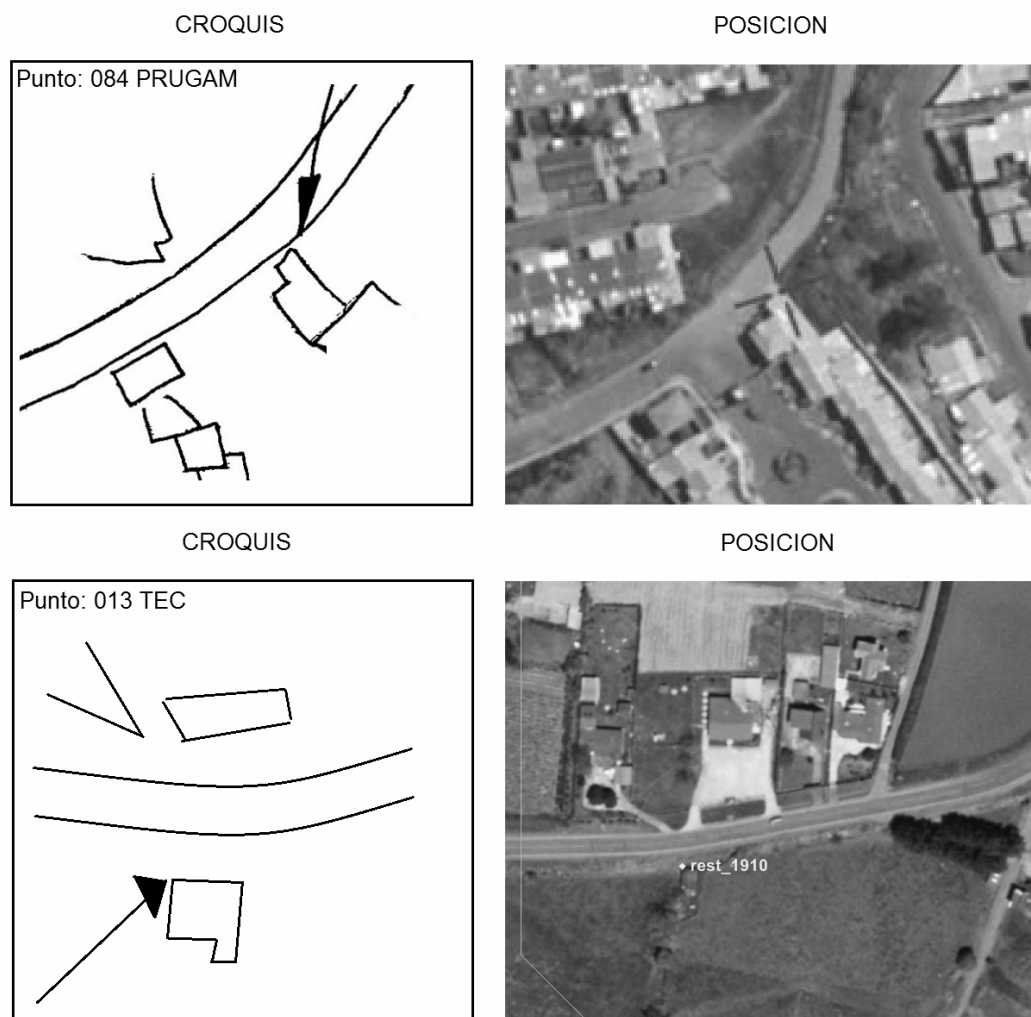


Figura 4. Ubicación externa de dos GCPs para las imágenes CARTA-2005.

Aerotriangulación Analítica Digital (AAD)

El proceso de aerotriangulación busca asociar física y matemáticamente las imágenes individuales disponible y las amarra a un bloque único del utilizando como referencia los datums horizontales y verticales de referencia. El software utilizado para este estudio fue ERDAS Imagine-LPS de Leica Photogrammetric versión 2011.

Punto	ID	Este (m)	Norte (m)	Elevación ortométrica (m)	Fuente
1	84	508468.227	1089728.375	1408.314	PRUGAM
2	83	506474.039	1091174.132	1422.685	PRUGAM
3	81	500408.336	1094427.504	1282.972	PRUGAM
4	75	515662.109	1087226.358	1287.209	PRUGAM
5	74	505659.410	1094723.547	1546.611	PRUGAM
6	60	507287.589	1097276.739	1947.864	PRUGAM
7	61	513629.784	1092319.247	1625.719	PRUGAM
8	45	515912.320	1095086.045	1961.431	PRUGAM
9	44	509082.544	1099571.126	2302.552	PRUGAM
10	43	505689.041	1101444.937	2051.836	PRUGAM
11	30	511865.323	1101252.101	2750.681	PRUGAM
12	31	516010.364	1098642.627	2597.022	PRUGAM
13	29	511129.526	1102329.952	2929.902	PRUGAM
14	23	515319.164	1102602.054	3405.798	PRUGAM
15	85	513338.232	1084848.913	1094.927	PRUGAM
16	82	503554.838	1090269.047	1386.729	PRUGAM
17	100	504030.204	1088024.001	1385.450	PRUGAM
18	101	505861.617	1086737.148	1383.669	PRUGAM
19	110	502140.315	1085174.702	1943.028	PRUGAM
20	161	504699.926	1083235.024	1842.781	PRUGAM
21	126	498700.221	1084064.117	1957.697	PRUGAM
22	125	495353.716	1088254.335	1496.965	PRUGAM
23	205	497076.230	1085542.267	1887.769	PRUGAM
24	3	510120.563	1089621.475	1399.049	ITCR
25	4	509937.563	1091249.816	1449.497	ITCR
26	5	509509.198	1090821.523	1432.562	ITCR
27	7	508978.591	1092470.646	1538.441	ITCR
28	8	508759.606	1090706.695	1437.481	ITCR
29	9	509965.555	1086728.290	1315.462	ITCR
30	10	506843.771	1093300.928	1519.391	ITCR
31	11	506809.174	1088484.997	1380.132	ITCR
32	12	501174.191	1088333.698	1413.366	ITCR
33	13	513185.474	1093449.078	1792.631	ITCR
34	14	512484.289	1095988.101	2095.109	ITCR
35	15	515278.460	1100265.196	2875.491	ITCR
36	16	512861.754	1098278.651	2339.675	ITCR
37	17	516035.115	1103158.253	3431.927	ITCR
38	18	516892.845	1103215.134	3349.668	ITCR
39	19	517019.404	1103342.340	3327.381	ITCR
40	20	513657.226	1088028.895	1347.415	ITCR
41	21	514725.100	1087853.764	1326.646	ITCR
42	22	514517.700	1084449.838	1055.068	ITCR

Cuadro 2. Puntos de control (GCPs) para el área de estudio.

El modelo matemático utilizado fue el de funciones racionales (RPC), el cual establece una correlación entre los píxeles de la imagen y su posición en el terreno partir del principio del parallax. Las diferencias medidas en base al parallax en un esquema pixel-pixel en imágenes estereoscópicas, son convertidas a elevaciones absolutas utilizando funciones trigonométricas y la información de orientación interna del sensor, ya sea la cámara aérea o los sensores orbitales. ERDAS-LPS utiliza un algoritmo único de correlación automática que se encarga de definir cuantos puntos de amarre (Tie Points por sus siglas en inglés) sean necesarios. El resultado de la ADD es una orientación exterior para cada imagen en una localización X, Y y Z.

ERDAS-LPS utiliza una estructura de pirámides para cada imagen. Estas pirámides constituyen archivos de minificación previamente generados con aproximadamente cinco niveles de proceso con diferente resolución. Esta estructura de pirámides es utilizada para iniciar la correlación espacial, partiendo de la más baja hasta mejorar el detalle en la imagen de resolución más alta. Un mínimo de tres puntos es comparado y emparejado por cada posición en la distribución de Grueber. Finalmente, un ajuste en bloque fue ejecutado utilizando ERDAS-LPS para calcular las coordenadas para cada punto de amarre (TPs) y determinar con precisión los parámetros de la orientación externa para cada imagen. Los parámetros de la orientación externa fueron utilizados en la orientación de los estéreo modelos y son igualmente usados como datos de entrada en los procesos de ortorectificación y compilación altimétrica. El ajuste del bloque permitió verificar la calidad de todos los puntos de control utilizados en la AAD. Aquellos puntos con mayor error se ajustaron o eliminaron de acuerdo a la calidad obtenida de la función de costo seleccionada, en este caso el RMSE. La Figura 5 muestra el resultado de la AAD para uno de los bloques armados con las imágenes CARTA-2005, arrojando un un RMSE_x de 1.54 m y un RMSE_y de 1.30 m para un RSME_{total} de 0.66 m.

Orientación Interna

Un total de 27 imágenes de la misión CARTA-2005 fueron utilizadas para extraer DEMs a partir del proceso ADD para el área en estudio (Figura 6). Originalmente se armó un bloque de 54 imágenes que abarcaban la totalidad del área de drenaje del río Navarro. Sin embargo, dichas imágenes presentaron un sinnúmero de inconformidades (claramente expresadas por la empresa española BLOM en su informe final a PRUGAM), que hicieron muy difícil y lenta su exitosa utilización, tanto en la elaboración de la restitución cartográfica como en la posterior generación de modelos de elevación digital DEM para el área de la cuenca del Toyogres. Los problemas de contraste, sombras, mal escaneo y pérdida de información de estas imágenes, hizo imposible su utilización como una composición a color RGB. Por lo tanto se descompusieron en sus respectivas bandas y solo la banda roja (la cual presenta mayor contenido de información) fue utilizada en el proceso ADD.

La cámara utilizada en este vuelo fue una Wild-RC30 cuyos parámetros de calibración (incluyendo puntos fiduciales y distancias focales) fueron certificados por el US. Geological Survey. Tales parámetros fueron incluidos en ERDAS-LPS para definir la orientación interna de la cámara (Figura 7).

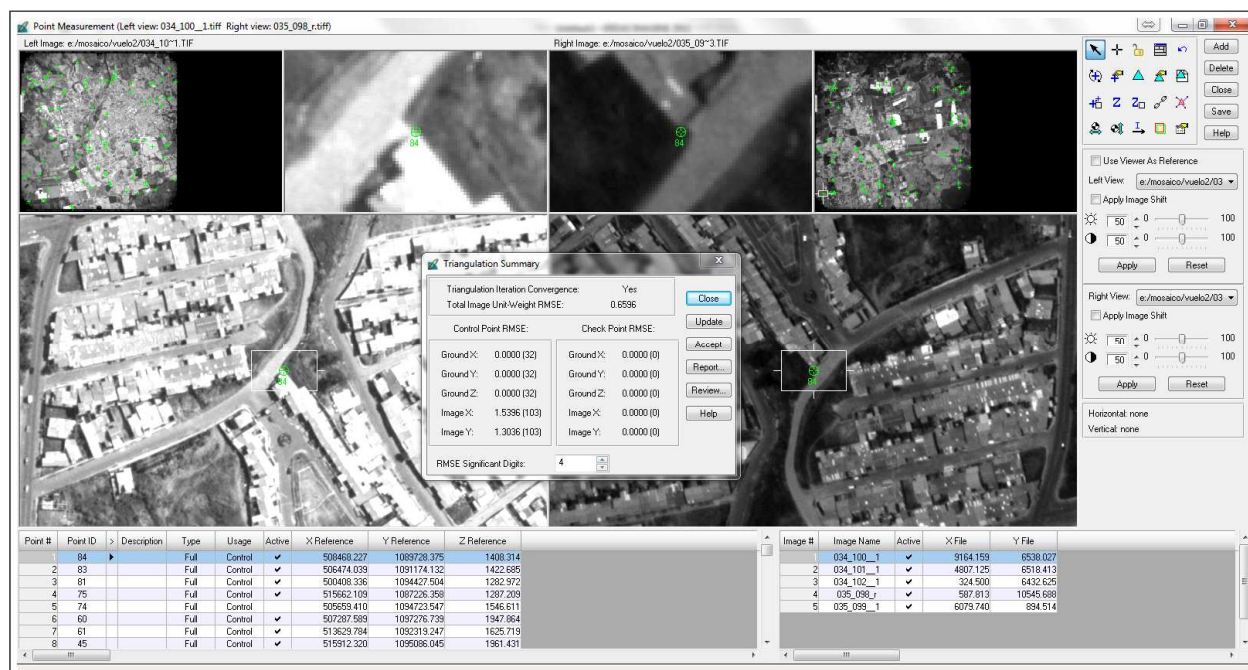


Figura 5. Resultados del ajuste RMSE con base al proceso ADD ejecutado por ERDAS-LPS.

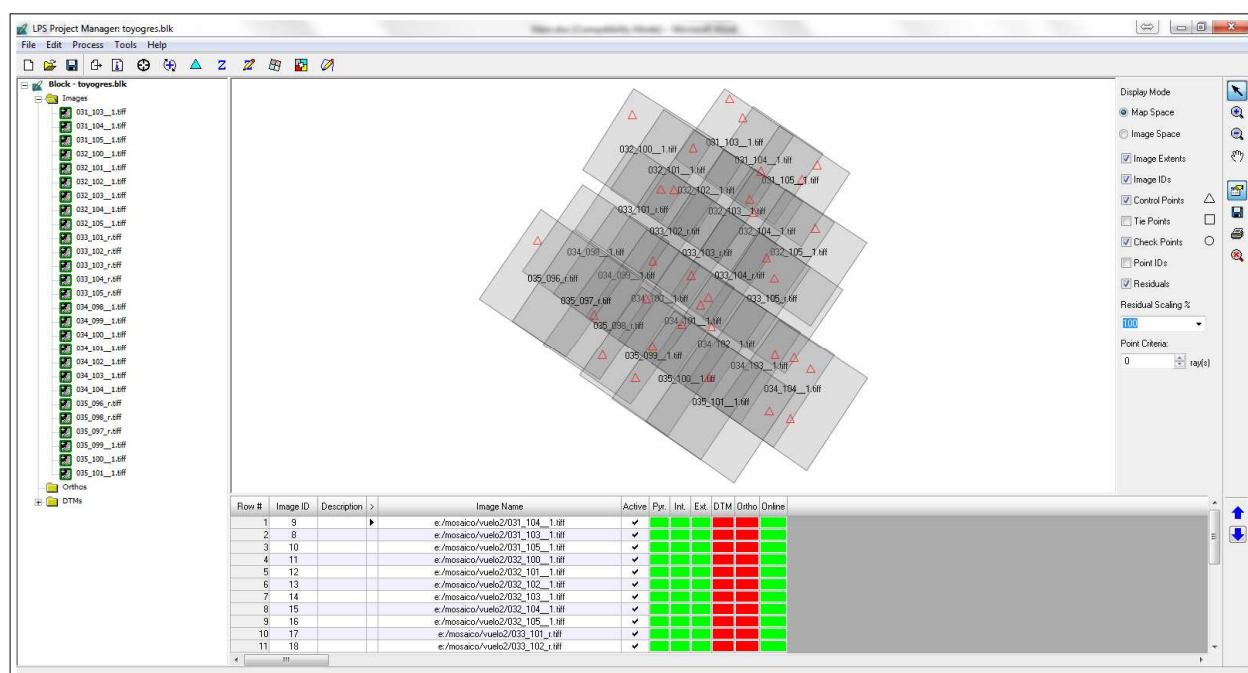


Figura 6. Bloque final de imágenes CARTA-2005 utilizado en el proceso de ADD.

Generación de Modelos de Elevación Digital (DEMs)

Una vez concluidos los procesos de orientación interna, externa y ADD, la ortorectificación de las imágenes arrojó un tamaño de píxel de 1.0 m tanto en las imágenes CARTA como en las satelitales. Se generó adicionalmente una red irregular de triángulos (TIN por sus siglas en inglés) a partir del DEM para producir una mayor calidad y continuidad en la rectificación de las imágenes. Los parámetros en ERDAS-LPS garantizaron una precisión en RMSE_{xy} equivalente a 1.5 veces el tamaño de píxel, es decir 1.5 m. Se decidió generar una nube de puntos en ERDAS-LPS para toda el área de estudio (Figura 8). La densidad de puntos para el área correspondiente a la cuenca de río Toyogres varió de 456 000 a 676 000 puntos para las imágenes CARTA y WV-2 respectivamente. Cada uno de éstos puntos contiene información precisa en X, Y y Z que fueron luego utilizados para generar curvas de nivel a cada 2.0 m. Dichas curvas de nivel fueron generadas mediante el GIS SAGA (Böhner *et al.* 2006) utilizando el proceso de interpolación del inverso del cuadrado de la distancia (Inverse Distance Function por sus siglas en inglés) con una potencia exponencial de factor 2. La Figura 9 resume las actividades realizadas alrededor de las imágenes CARTA 2005 y WorldView-1 para la producción final de los DEMs.

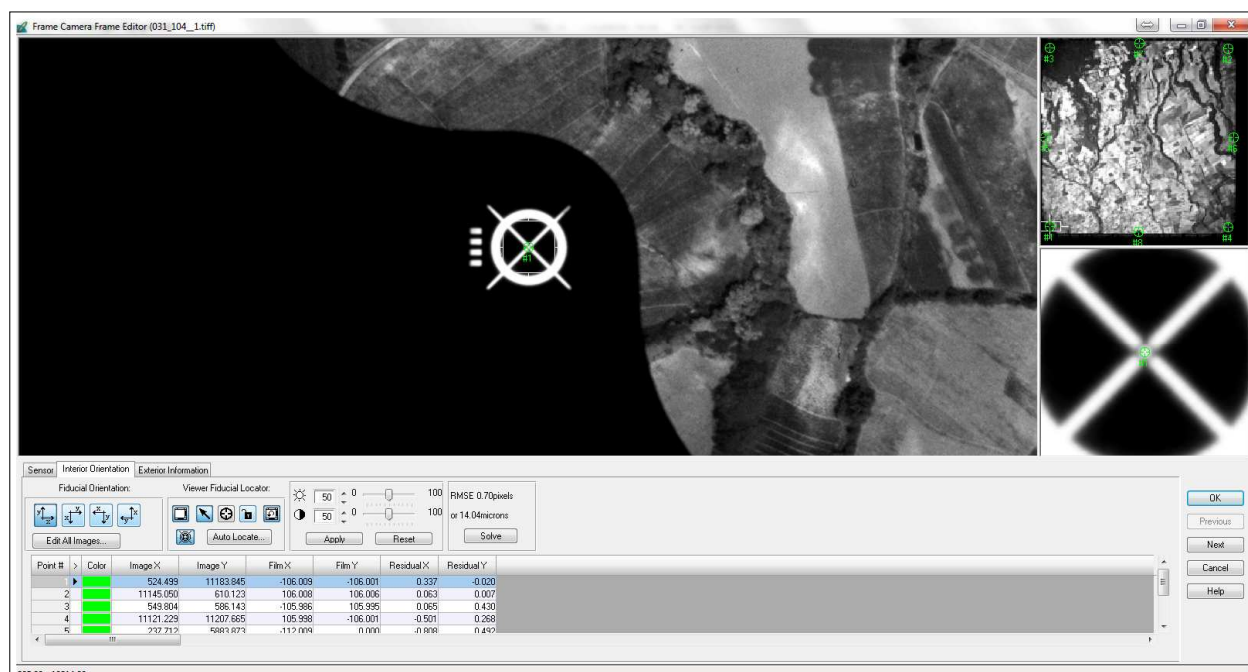


Figura 7. Puntos fiduciales ligados a la orientación interna de una de las imágenes CARTA-2005.



Figura 8. Nube de puntos generada por ERDAS-LPS para la hoja cartográfica Tejar a partir de las imágenes satelitales VW-2. Los puntos marcan posiciones X,Y,Z mientras que los polígonos marcan lo que se considera la red de drenaje del área adyacente.

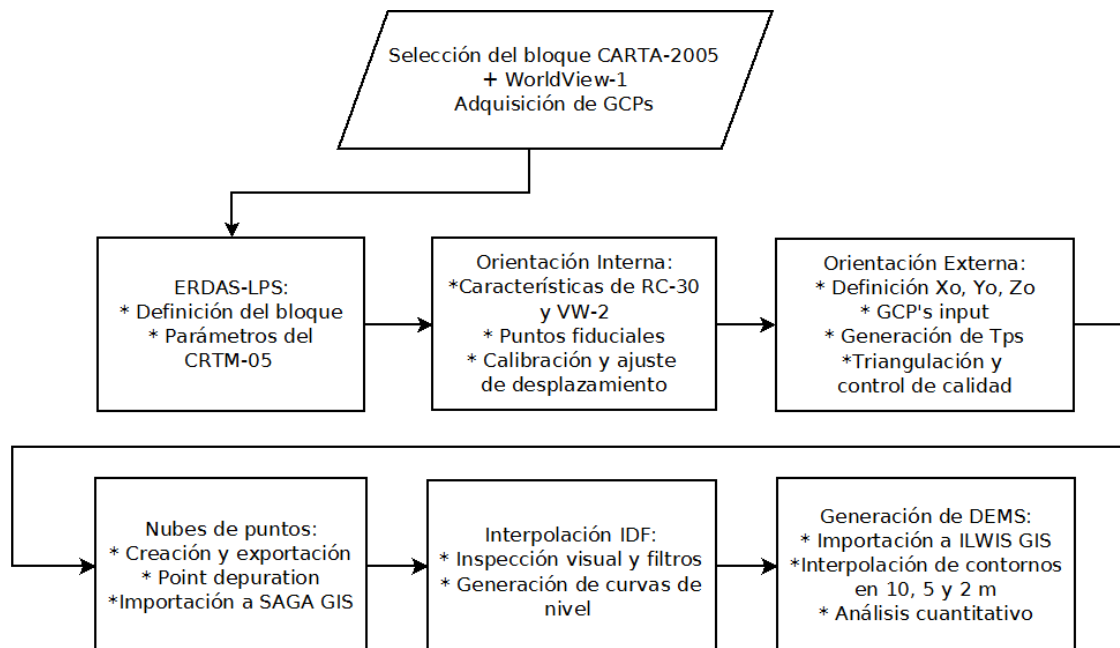


Figura 9. Diagrama de flujo para la generación de DEMs.

Control de Calidad

El control de calidad de los DEMs generados se realizó de forma cualitativa a través de inspección visual de los contornos generados y de forma cuantitativa mediante la aplicación de la función objetivo raíz del error cuadrático medio o (RMSE por sus siglas en inglés). El RMSE (ec. (1)) fue utilizado para evaluar la desviación entre los GCPs (Cuadro 2) considerados como observaciones contra los valores de elevación de cada DEM derivado a partir de la nube de puntos generada por ERDAS-LPS.

$$\text{RMSE} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Donde; n se refiere al número total de observaciones, [-]; O_i es el valor observado en el intervalo i, [-]; y M_i es el valor modelado en el intervalo i, [-].

Hidroprocesamiento

A partir de las curvas de nivel, se generaron modelos de elevación digital (DEMs) con resoluciones de 10, 5 y 2 m utilizando el método de construcción lineal del Borgfors (ITC 2001). El primer DEM generado, correspondió a aquel con una resolución de 2 m, posteriormente se ejecutó un re-muestreo utilizando el algoritmo de vecino más cercano (Nearest Neighbor en inglés) para construir los DEMs a 5 y 10 m respectivamente. Tales DEMs fueron procesados para su utilización en el modelo SWMM mediante las herramientas de hidroprocesamiento incluidas en el GIS ILWIS. El objetivo primordial de esta colección de procedimientos es la extracción de la red hidrológica y la determinación del número de subcuencas que integran tanto la cuenca del río Toyogres como la de la quebrada Zopilote. Las subcuencas son definidas como la unidad de discretización básica de una cuenca hidrológica. El diagrama de flujo mostrado por la Figura 10 resume las actividades secuenciales alrededor del hidroprocesamiento para entidades raster. La dirección de flujo se determinó utilizando el método determinístico D8 de la máxima pendiente mientras que la acumulación de flujo y el orden de la red de drenaje obedeció el criterio de Strahler (ITC 2001). Para lo anterior, se incluye el acondicionamiento de los diferentes DEMs mediante la aplicación de un algoritmo de remoción de depresiones que asegura la conectividad hidráulica a lo largo de la superficie del DEM. Dado que parte del área de estudio está ocupado por uso netamente urbano, un mapa de callejeros a escala 1:10 000 fue “quemado” (burned-in) sobre los DEMs ya optimizados.

El objetivo de este quemado fue forzar al algoritmo para que la dirección y acumulación de flujo obedeciese de una forma representativa las líneas de flujo preferenciales, que las calles representan sobre la conducción y canalización de la escorrentía superficial. De esa manera, las condiciones de frontera y la delimitación espacial de las subcuencas, fue por demás representativa.

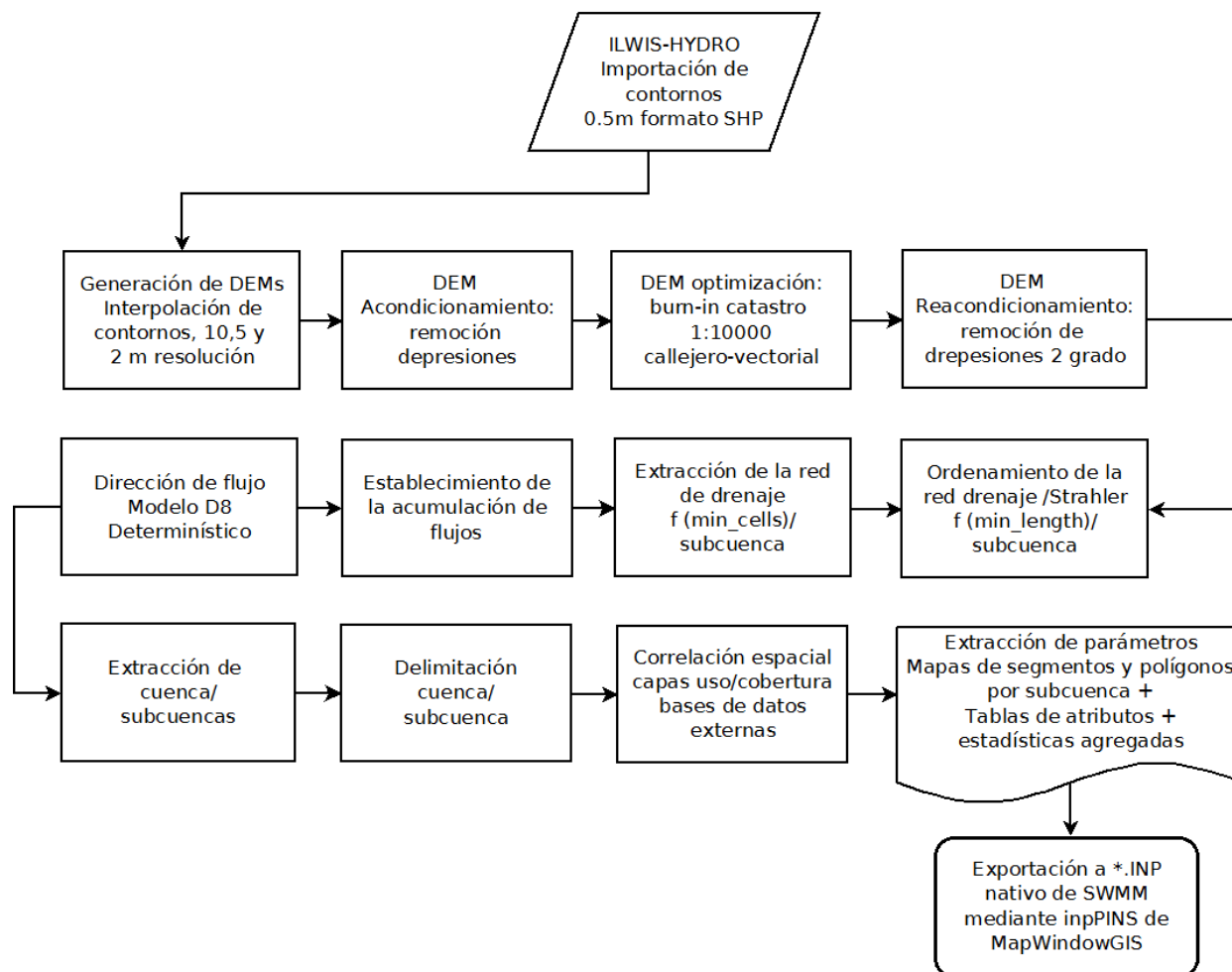


Figura 10. Diagrama de flujo ligado a las funciones de hidroprocesamiento.

Aquellas secciones con líneas de alcantarillado que fueron identificadas (principalmente para la cuenca de la quebrada Zopilote) fueron cuidadosamente incluidas en ILWIS. Para ello se utilizaron mapas y levantamientos topográficos suministrados por la Municipalidad de Cartago. Actualmente, la mayor parte de la ciudad de Cartago no cuenta con alcantarillado pluvial. La infraestructura se limita a cunetas y a las calles mismas, que de acuerdo a la topografía, desembocan en los cauces naturales. Es importante mencionar que con el propósito de minimizar la inferencia del proceso de quemado sobre la red natural de drenaje, un geoproceto de buffer fue previamente ejecutado sobre cada DEM haciendo uso de una capa vectorial de drenaje previamente existente (TERRA, 1998). La distancia radial del buffer para la red de drenaje fue de 50 m lineales (Figura 8). Dado que desde el principio se contempló un mayor grado de discretización espacial para la cuenca del Zopilote; dos diferentes umbrales de acumulación fueron aplicados. Lo anterior, implica que para un mismo DEM; dos diferentes hidroprocesos fueron ejecutados de manera paralela. Para la cuenca del Toyogres, un umbral de 0.25 Km^2 fue seleccionado mientras que para la cuenca del Zopilote, el umbral seleccionado fue de 0.05 Km^2 independientemente de la resolución

del DEM (10, 5 o 2 m). Finalmente y a partir de las diversas capas raster anteriormente descritas, se crearon capas poligonales de carácter vectorial representando la delimitación física de cada cuenca y subcuencas; conteniendo sus respectivas tablas de atributos que fueron posteriormente exportadas a SWMM mediante la extensión inpPINS de MapWindow GIS (Watry *et al.* 2007). Diversos procesos de correlación espacial fueron utilizados para incluir atributos ligados a uso de suelo y cobertura.

Descripción del Modelo SWMM

El modelo computacional seleccionado para este caso de estudio es el modelo de gestión de aguas pluviales SWMM (Storm Water Management Model por sus siglas en inglés), el cual es un modelo físicamente basado totalmente distribuido para el análisis hidrológico e hidráulico de redes de drenaje esencialmente urbanas (Huber & Dickinson 1988). Estructuralmente, SWMM simula la respuesta de la cuenca a partir de datos de precipitación y parámetros físicos y numéricos relevantes. El modelo conceptualiza los diversos procesos dentro del dominio del balance hídrico a manera de compartimentos dentro de los que destacan:

- RAIN: responsable de la administración y distribución espacial de la precipitación a través de series temporales generadas o hidrogramas unitarios externos.
- RUNOFF: función de transformación del proceso precipitación-escorrentía de tipo conceptual semi-distribuido a partir del modelo de onda cinemática de Chezy-Manning.
- GROUNDWATER: compartimiento de cuantificación del nivel de humedad del subsuelo (SMA) como contribución de agua subterránea.
- EXTRAN: compartimiento de tránsito hidráulico físicamente basado totalmente distribuido unidimensional (1D) capaz de resolver el sistema ecuaciones de Saint-Venant para flujo a presión o flujo libre gradualmente variado.
- TRANSPORT: función de análisis para el transporte y destino de contaminantes en escorrentía.
- TREATMENT: capaz de predecir el nivel de tratamiento y calidad de las aguas de escorrentía de acuerdo a un esquema previamente seleccionado.

La conceptualización del modelo se basa en entidades de tipo vectorial; líneas y nudos, lo cual limita a todo el sistema de drenaje a una estructura de red dendrítica (Figura 11). Los diversos componentes de la escorrentía generada son entonces conducidos entre los nudos hasta el punto de descarga, el cual representa físicamente las condiciones de frontera del modelo (Rossman 2007). Una vez que SWMM genera la respuesta de la cuenca a un determinado evento de precipitación, esta se expresa a manera de hidrograma. El hidrograma representa la evolución temporal de la tasa de flujo en el punto de descarga de la cuenca. Sin embargo, esta respuesta debe ser calibrada contra registros reales de flujo. Este último punto, representa un problema matemático inverso de alta complejidad que hace necesaria la recolección de datos de observación y poderosos algoritmos de calibración.

Dado que en el caso de SWMM los parámetros son esencialmente físicos por tratarse de un modelo distribuido, éstos pueden ser potencialmente regionalizados a otras cuencas similares sin que existan mayores limitaciones de carácter metodológico. Debe admitirse que no es factible instrumentar todas las cuencas del país, sin embargo; es necesario predecir el nivel de respuesta hidrológico y el riesgo de inundación de las mismas a través de ecuaciones regionales. Esto incluye escenarios tanto actuales como futuros ante los procesos de cambio climático y crecimiento demográfico, principalmente en áreas urbanas.

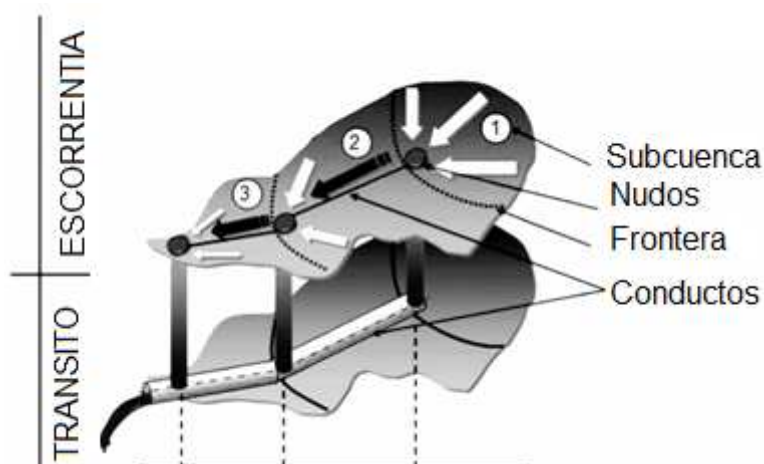


Figura 11. Diagrama esquemático del modelo SWMM.

Fuente: (Park *et al.* 2008)

Escorrentía Superficial

En SWMM, el compartimento de generación de escorrentía superficial es tratado de una manera semi-distribuida, mediante la desagregación de la cuenca en subcuencas o áreas tributarias de características presuntamente homogéneas. Lo anterior implica que las variables de control y los parámetros permanecen constantes para cada subcuenca (Park *et al.* 2008).

El balance de masas es entonces resuelto para cada subcuenca de acuerdo a la Eq. (2), donde $\Delta S/\Delta t$ representa el cambio del almacenamiento con respecto del tiempo, [$L t^{-1}$]; R es la precipitación, [$L t^{-1}$]; ET es la evapotranspiración, [$L t^{-1}$]; I representa las pérdidas por infiltración, [$L t^{-1}$] y Q representa la tasa de flujo, [$L t^{-1}$].

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = R - ET - I - Q \quad (2)$$

Cada subcuenca es tratada como un reservorio no lineal donde los flujos de entrada provienen de la precipitación o de alguna contribución externa específica. Los flujos de salida son básicamente consecuencia de la infiltración, la evapotranspiración y la escorrentía superficial (Figura 11). La capacidad de almacenamiento de cada reservorio

es la altura de almacenamiento en depresión, la cual depende del estado de humedad antecedente del suelo y del tipo de superficie. Consecuentemente, existirá flujo (Q), únicamente cuando la altura de agua (d) en el reservorio exceda la máxima capacidad de almacenamiento en depresión (d_p). Un modelo de onda cinemática basado en los planteamientos de Chezy-Manning es utilizado para describir el movimiento y propagación hidráulica de los flujos generados por escorrentía superficial (Eq.(3)).

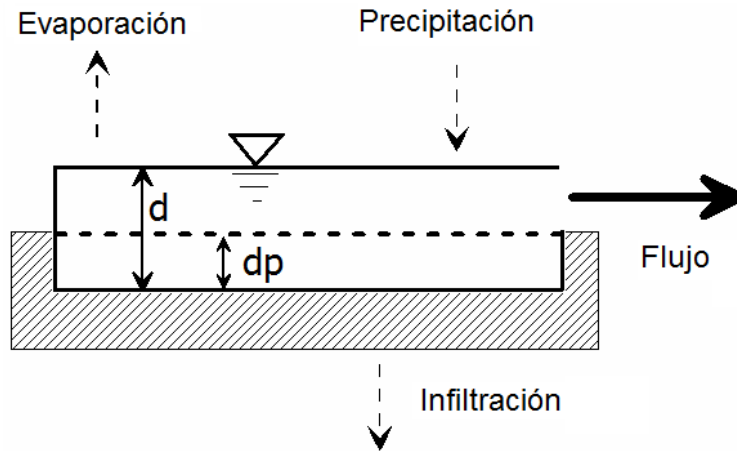


Figura 12. Componentes del balance de masas de SWMM

$$Q = \frac{W (d - d_p)^{5/3} S_o^{1/2}}{\eta} \quad (3)$$

Donde; W representa el ancho característico del plano del modelo cinemático, [L]; d es la profundidad de agua en el reservorio, [L]; S_o es la pendiente promedio de la cuenca, [-]; n es el coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie, [$t L^{-1/3}$] y Q es la tasa de flujo, [$L t^{-1}$].

La profundidad de la lámina de agua es constantemente actualizada en cada intervalo de cálculo mediante la solución numérica del balance de masas (Eq.(3)). En lo que respecta al ancho característico del plano del modelo cinemático (W), diversas fórmulas han sido desarrolladas para relacionar la geometría heterogénea de subcuencas naturales a planos geométricos homogéneos que puedan ser utilizados en el modelo de Manning. Para efectos de este estudio, se ha utilizado la formulación propuesta por Guo & Urbonas (2009), la cual estipula que:

$$\frac{W}{L} \approx 2.286 * (1.5 - Z) \quad (4)$$

Donde; W representa el ancho característico del plano del modelo cinemático, [L]; L es la ruta de flujo al punto de concentración más lejana, [L]; y Z representa el coeficiente

de asimetría geométrica el cual varía de 0.5 a 1.0. Las funciones de análisis espacial GIS se utilizan para derivar dicho índice.

Tránsito Hidráulico

Con el propósito de simular el flujo hidráulico en redes de conductos, tanto secciones abiertas como tuberías, el compartimento de tránsito hidráulico de SWMM aplica las ecuaciones de flujo turbulento, gradualmente variado de Saint Venant (Rossman 2007). Dichas ecuaciones representan el principio de conservación de la masa y el momentum (Eq. (5) y Eq. (6)) respectivamente. En este sentido, este compartimento de SWMM se considera como totalmente distribuido, físicamente basado unidimensional (1D).

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = S_o - S_f \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Donde; y representa el tirante hidráulico, [L]; v la velocidad, [L t⁻¹]; x es la distancia longitudinal del plano, [L]; t es tiempo, [t]; g es la aceleración de la gravedad, [L t⁻²]; S_o es la pendiente del conducto, [-]; S_f es la pendiente del plano de fricción, [-]; A representa el área de la sección transversal, [L²] y Q representa la tasa de flujo, [L³ t⁻¹].

Los componentes de la ecuación de conservación del momentum (Eq. (5)) representan respectivamente; la presión hidrostática, la aceleración convectiva, la aceleración local, gravedad y pérdidas de energía por fricción.

Para representar los efectos de turbulencia y viscosidad, la pendiente de la línea de energía (S_f) es calculada mediante la ecuación de Chezy-Manning:

$$S_f = \frac{Q^2}{\frac{1}{n^2} A^2 R^{4/3}} \quad (7)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning para el conducto, [t L^{-1/3}]; R es el radio hidráulico, [L]; Q es la tasa de flujo, [L³ t⁻¹] y A es el área transversal de la sección, [L²].

Si la Eq. (7) es sustituida en la Eq. (5), la ecuación resultante debe ser entonces resuelta para la tasa de flujo Q :

$$Q = \left(\frac{1}{\eta} AR^{2/3} \right) * \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} - S_o \right)^{1/2} \quad (7)$$

Dado que no existe una solución analítica posible, un método iterativo de diferencias finitas es aplicado por SWMM para resolver las ecuaciones de Saint Venant. En el caso de que se presenten condiciones de flujo presurizado en tuberías o algún otro tipo de conducto cerrado, la ecuación de Chezy-Manning es complementada ya sea por la ecuación de Hazen-Williams o Darcy-Weisbach con el propósito de tomar en cuenta pérdidas por fricción, principalmente de orden local (Rossman 2007).

Finalmente, el número de Froude (Eq.(9)), el cual es el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales, representa un importante indicador del estado de flujo en un conducto determinado, siendo esta clasificación subcrítica, crítica o supercrítica.

$$F = V/\sqrt{g \cdot d} \quad (9)$$

Donde F representa el número de Froude, [-]; V es la velocidad media for the average 1-D en la sección transversal, [L T⁻¹]; d es el tirante hidráulico en la sección del conducto, [L] y g representa la aceleración de la gravedad, [L t⁻²].

Una condición supercrítica es característica de flujos turbulentos, mientras que una condición subcrítica representa contrariamente condiciones de flujo laminar.

Condiciones de Frontera

SWMM posee diversidad de condiciones de frontera dependiendo de cada compartimento. En el caso de la escorrentía superficial, una condición Neumann de no-flujo es aplicada a los límites físicos de cada subcuenca. En el caso del tránsito hidráulico, una condición de cabezal-dependiente o Cauchy es aplicada en cada nudo o conducto de la red de drenaje y en el punto de vertido de la cuenca. Para este último, un estado de cabezal-constante de Dirichlet es asumido para efectos de este proyecto.

Pérdidas por Infiltración

SWMM incluye diversas metodologías para la estimación de las pérdidas por infiltración, incluyendo Horton, Green-Ampt, y el método del número de curva (CN) de la SCS (Soil Conservation Service por sus siglas en inglés). La metodología seleccionada depende grandemente de la cantidad de información de suelos disponible. En éste caso, el método CN-SCS fue seleccionado dada la poca disponibilidad de información de suelos. Una de las limitaciones que se le achaca al método de cn, es el hecho de que se trata de un parámetro empírico y que en intervalos temporales muy densos; es posible que no resulte del todo representativo (Camorani *et al.* 2005). Registros históricos de pruebas de infiltración realizadas desde mediados de los años 90 por personal del CIVCO fueron originalmente consideradas para alimentar el modelo de

Green-Ampt. Sin embargo se encontraron varias inconsistencias por lo que esta idea fue abandonada. La relación fundamental del CN-SCS está dada por:

$$V = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (10)$$

Donde; V es el volumen de escorrentía, [L]; P es el volumen de precipitación, [L]; S es el parámetro de capacidad de almacenamiento del suelo, [L], y que representa el máximo volumen de agua almacenable en el perfil de suelo saturado.

El parámetro S es empíricamente determinado como una función del número de curva (CN) de acuerdo a:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (11)$$

El parámetro del número de curva (CN) varía de 0 a 100 y depende del tipo de cobertura-uso del suelo y de la condición hidrológica de la cuenca. Para un esquema semidistribuido basado en subcuencas, CN se considera homogéneo dentro de cada subcuenca. CN depende de la condición de humedad antecedente del suelo. Para efectos de este estudio, la condición antes de cada evento de precipitación se considera como promedio (AMC(II)). Dada la alta pendiente de las cuencas en estudio, se compensó el número de curva por pendiente de acuerdo al planteamiento de Williams (1995) (Eq.(12)):

$$CN_{2S} = \left(\frac{CN_3 - CN_2}{3} \right) * [1 - \exp(-13.86 * SLP)] + CN_2 \quad (12)$$

Donde CN_{2S} representa la condición de humedad antecedente media ajustada por pendiente, [-]; CN_3 es el número de curva para condición saturada con pendiente estándar de 5%, [-]; CN_2 es el número de curva para condición seca con pendiente estándar de 5%, [-]; y SLP es la pendiente media del área tributaria o subcuenca [-].

En el caso de existir más de un uso de suelo dentro del área que abarca cada subcuenca, un proceso de ponderación por peso es aplicado para determinar el valor promedio de CN (Eq.(13)) :

$$CN_{\text{weighted}} = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (13)$$

Donde; CN_{weighted} representa el número de curva ponderado por subcuenca, [-]; CN_i es el respectivo número de curva de acuerdo a cada uso del suelo presente, [-]; A_i es el área que comprende cada uso de suelo, [-]; y n es la cantidad de usos de suelo que existen en la subcuenca [-].

Estimación de Parámetros

Los parámetros de la mayoría de los modelos hidrológicos son comúnmente categorizados como parámetros medibles o parámetros inferibles (Yu *et al.* 2001; Choi & Ball 2002).

Los parámetros medibles reflejan características geométricas de los objetos tales como el diámetro de las líneas de tubería de un alcantarillado, la elevación de la superficie, el área de una subcuenca, la profundidad de un pozo de registro, etc. Los parámetros inferibles por su lado, no pueden ser directamente medidos en el campo y deben ser inferidos o derivados, muchas veces a través de capas de información geográficas utilizando herramientas GIS. En términos generales, los parámetros medibles, físicamente basados se consideran libres de error, mientras que los parámetros inferibles necesitan ser optimizados durante el proceso de calibración (Choi & Ball 2002). Sin embargo, debido al margen de error asociado a la medición de parámetros físicos y a su inherente variabilidad espacial, muchos parámetros medibles son igualmente incluidos en el proceso de calibración (Temprano *et al.* 2006). Para efectos de éste estudio, la mayoría de los parámetros, tanto medibles como inferibles fueron derivados a través de las capas de información geográfica disponibles. A continuación se exponen detalles de los parámetros más relevantes para el modelo SWMM.

Porcentaje de área impermeable (**pimp**) y número de curva SCS-CN (**cn**)

El porcentaje del área total por subcuenca que se considera como impermeable, fue derivado de la combinación de dos fuentes de información espacial, las imágenes satelitales multiespectrales del WorldView-2 y de las capas vectoriales de uso del suelo a escala 1:10 000 producidas por el PRUGAM (2008). Originalmente en formato *.DNG, los polígonos de uso de suelo, correspondientes al vuelo CARTA-2005 fueron actualizados al año 2011 mediante las imágenes del WV-2. Aun cuando se contemplaban 36 diferentes clases de uso del suelo, se reclasificaron a 8 clases relevantes (Cuadro 3)

Tipo Clase	Nomeclatura	ID Clase	pimp (%) *	SCS-CN **
Residencial alta densidad	HDRES	1	0.8	85
Residencial media densidad	MDRES	2	0.6	80
Residencial baja densidad	LDRES	8	0.3	75
Comercial	COMER	3	0.85	90
Industrial	INDUS	4	0.85	90
Tranporte	TRANS	5	0.9	98
Protección	PROTEC	6	0.05	65
Cultivos	CROPS	7	0.05	70

Cuadro 3. Clasificación de uso utilizada en la parameterización del modelo SWMM.

Fuente * / Fuente ** (Rossman 2007)

Valores típicos de pimp y cn fueron tomados de Rossman (2007). Mapas de suelo en escala 1:200 000 suministrados por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG 1989) fueron usados en la selección del grupo suelo necesario para la correcta selección del número de curva. Varios geoprocesos, incluyendo agregación, superposición y proximidad fueron ejecutados en ILWIS con el objeto de incluir estos parámetros de forma proporcional en las tablas de atributos *.DBF ligadas a las capas vectoriales por subcuenca en formato *.SHP.

Ancho característico del plano del modelo cinemático (**widt**)

Para efectos de este estudio, se utilizó la formulación propuesta por Guo & Urbonas (2009), (Eq (4)). El toolbox de hidroprocesamiento de ILWIS fue utilizado para calcular widt con base en los atributos físicos obtenidos a partir del DEM seleccionado, lo cual incluyó la distancia más lejana al punto de concentración y el coeficiente de asimetría geométrica por subcuenca.

Láminas de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable (**dimp**) y sobre el área permeable (**dper**)

Valores típicos (Rossman 2007) de acuerdo a la cobertura del terreno mostrada por los mapas de cobertura fueron utilizados para seleccionar dichos parámetros por subcuenca (Eq.(3)).

Rugosidades y Geometría

Con el propósito de resolver las Eq.(3) y Eq.(7), SWMM requiere información sobre los coeficientes de rugosidad de Manning tanto para el flujo superficial sobre el área impermeable (**nimp**), flujo superficial sobre el área permeable (**nper**) y tránsito hidráulico (**ncha**) ya sea en secciones abiertas o tuberías. Estos coeficientes describen la resistencia del flujo sobre una determinada superficie y dependen tanto de la naturaleza misma de la superficie como del estado de flujo (Mays 2000). La selección

de los valores utilizados para estos parámetros se estimaron basados en los trabajos de Huber & Dickinson 1988; Tsihrintzis & Hamis 1998; Wanielista & Yousef 1993 y Chow *et al.* 1988. En relación a la geometría de red de drenaje, la Municipalidad de Cartago y el ITCR realizaron levantamientos topográficos con GPS de secciones relevantes de los cauces del río Toyogres y la quebrada Zopilote (Figura 13). Donde no se contó con levantamientos específicos, se asumieron secciones típicas basadas en cortes extraídos del DEM correspondiente. En lo que concierne a tuberías de alcantarillado, las cuales estaban localizadas principalmente en el área correspondiente al Zopilote, se encontraron tuberías de concreto con secciones de entre 200 y 400 mm con pozos de registro estándar de 1.2 m de diámetro. La información existente se encontraba en formato análogo o digital *.DXF, por lo que todos los atributos fueron traducidos a formato *.SHP. Todos los puentes a lo largo de cada cauce principal fue analizado geoméricamente y sus coeficientes de contracción de entrada y salida fueron asumidos a partir de valores típicos.

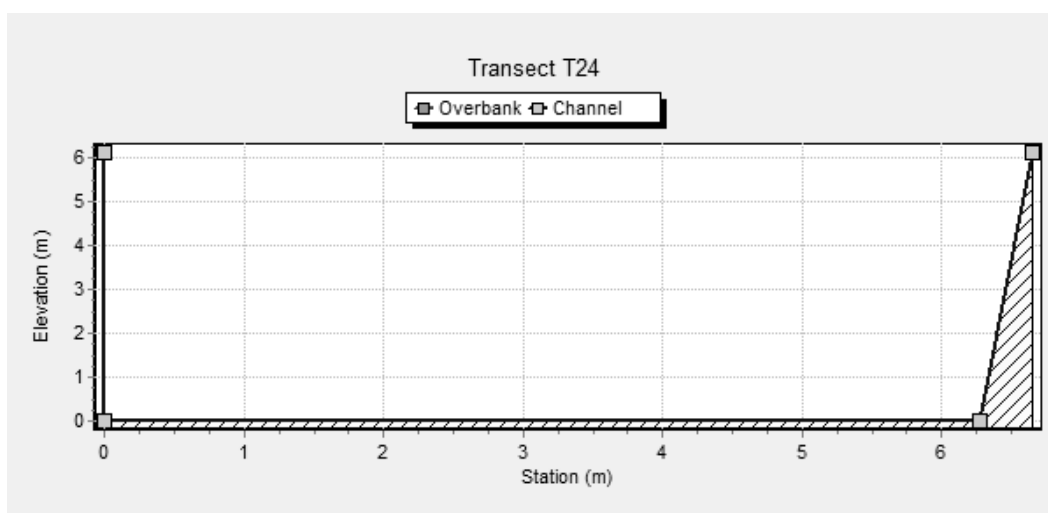


Figura 13. Corte transversal de la sección T24 correspondiente al cauce principal del río Toyogres.

Calibración y Análisis de Sensibilidad

Dado que la selección y posterior optimización manual de parámetros medibles o inferibles es por demás subjetiva, resulta difícil evaluar la confiabilidad de las predicciones de tal modelo (Kumar *et al.* 2009). Ya que las desviaciones entre los valores observados y aquellos predichos por el modelo podría estar por fuera del rango mínimo de tolerancia permitido, una optimización de parámetros más detallada podría ser necesaria, en el este caso, utilizando un esquema de calibración y optimización automático. En un esquema de optimización automático, los parámetros son automáticamente ajustados de acuerdo a una determinada metodología de búsqueda y con base en funciones objetivo que cuantifican la bondad de ajuste entre observaciones y modelaciones, alcanzando así el set óptimo de parámetros que define el mínimo absoluto del espacio paramétrico del modelo (Skahill & Doherty 2006). El paquete de optimización automática de parámetros PEST, un acrónimo de Parameter Estimation (Doherty 2005), fue utilizado para calibrar el modelo SWMM. PEST fue seleccionado

por varias razones estratégicas. Primero, PEST es una aplicación independiente al modelo, lo cual evita tener que realizar modificaciones al código original del programa ya que PEST se comunica a través de los archivos propios de entrada y salida del modelo. Segundo, PEST ha sido exitosamente utilizado en numerosos tipos de modelos incluyendo; modelos de aguas subterráneas (Doherty 2005; Christensen & Doherty 2008), modelos hidrológicos (Arabi *et al.* 2007; Immerzeel & Droogers 2008; Bahremand & de Smedt 2010), modelos de humedad de suelo (Tischler *et al.* 2007) y modelos hidráulicos de flujo a presión (Maslia *et al.* 2009; Koppel & Vassiljev 2009). Tercero, PEST puede ser utilizado para llevar a cabo diversas tareas de índole predictivo y exploratorio incluyendo análisis de sensibilidad, correlación e incertidumbre. Cuarto, PEST de dominio público por lo que puede ser utilizado sin restricciones de licenciamientos.

PEST es un programa de búsqueda baso en los algoritmos de Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) el cual examina el espacio paramétrico del modelo con el objeto de encontrar el set de parámetros óptimo que minimice las desviaciones entre observaciones y modelaciones. PEST utiliza la suma del cuadrado de las desviaciones PHI (Φ) como su función objetivo (Skahill 2009), la cual puede ser expresada matemáticamente como:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n w_i (O_i - M_i)^2 \quad (14)$$

Donde; n representa el número total de observaciones, [-]; O_i es el valor observado en el intervalo i, [-]; M_i es el valor modelado en el intervalo i, [-] y w_i es el peso relativo asignado a cada observación [-].

Al inicio de cada iteración, la relación entre los parámetros cambiantes del modelo y los valores de salida son evaluados para el set de parámetros en ejecución. Con el objeto de evaluar la sensibilidad de cada parámetro, tanto, las derivadas parciales de todas las observaciones con respecto a cada parámetro ajustable deben ser calculadas. La sensibilidad de cada parámetro es calculada utilizando una forma normalizada de una matriz Jacobiana (J) la cual retiene la derivada parcial de cada parámetro. La sensibilidad compuesta (s) de cada parámetro (l) es la magnitud del vector compuesto por lo columna de la matriz Jacobiana perteneciente al parámetro correspondiente y multiplicado por el peso relativo asignado a cada observación almacenada en la matriz cuadrada diagonal (Q) y dividida por el número total de observaciones (m) de acuerdo a lo estipulado por la Eq. (15):

$$S_L = \left(J^t Q J \right)^{1/2} \quad LL/m \quad (15)$$

Al inicio de cada iteración, PEST varía cada parámetro ajustable de forma incremental y re-ejecuta el modelo con el propósito de evaluar su sensibilidad. PEST determina si más iteraciones son necesarias para alcanzar la desviación mínima esperada. Dado

que PEST se comunica a través de los propios archivos de entrada y salida del modelo, Implica que el modelo como tal debe ser ejecutable desde modo comando.

Para conectar SWMM con PEST, varios archivos de entrada deben ser construidos (Figura 14). En el caso de SWMM, el archivo maestro de entrada tiene el sufijo *.INP. Este archivo ASCII contiene toda la información necesaria para ejecutar al modelo desde el modo comando haciendo uso de la extensión SWMM5.EXE. Luego de que SWMM se ha ejecutado, los archivos texto y binario *.TXT y *.GRD son respectivamente creados.

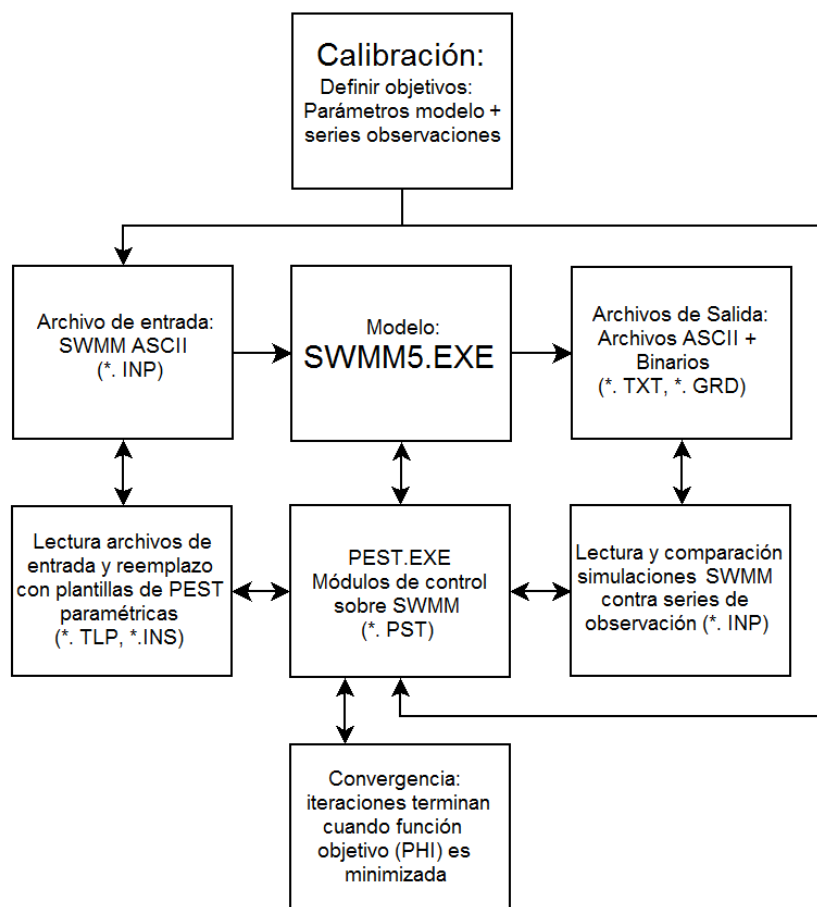


Figura 14. Diagrama de flujo ligado a la conexión de PEST con SWMM.

En el caso de PEST, tres diferentes tipos de archivos deben ser construidos; un archivo plantilla (*.TLP), el cual es básicamente una copia del archivo de entrada *.INP, un archivo de control (*.PST) el cual contiene los parámetros numéricos de control de PEST y finalmente, un archivo de instrucciones (*.INS) el cual dirige a PEST donde y como leer los valores modelados de SWMM y compararlos a su vez con los registros observados. En el curso de su ejecución, PEST crea diversos archivos de salida que son almacenados para su posterior inspección (Doherty 2005).

En términos de evaluación de la calidad del proceso de calibración con PEST, se seleccionó la función objetivo de eficiencia de Nash & Sutcliffe (1970), la cual está definida como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(Q_{obs_i} - Q_{m_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs} \right)^2} \quad (16)$$

Donde; NS representa la eficiencia en términos fraccionarios, [-]; Qobsi representa las observaciones de caudal, [L3/T]; Qmi es el valor modelado del caudal, [L3/T] y Qobs representa el promedio de las observaciones de caudal, [L3/T].

El error relativo absoluto se utilizó en la cuantificación del error volumétrico relativo (Ev); el error pico relativo (Ep) y el error relativo al tiempo pico (Ept). La ecuación general está definida como:

$$Error = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n (O_i - M_i) \right|}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (17)$$

Donde; n representa el número total de observaciones, [-];, Oi es el valor observado en el intervalo i, [-] y Mi es el valor modelado en el intervalo i.

Para la calibración de SWMM con PEST, se utilizó un procesador Intel® Core™ i7-930, de 2.80 GHz multi-core con 24 GB de RAM. Para cada tormenta, tanto en la cuenca del Toyogres como en la del Zopilote, PEST alcanzó el equilibrio en menos de 2 minutos.

Modelo de cambio temporal de cobertura

El modelo de simulación simultánea de cambio de uso / cobertura de suelo (MSSCUS), basado en los planteamientos de las cadenas de Markov, Autómata Celular (AC), y evaluación multi-criterio/ multi-objetivo (EMC) integrado en el GIS IDRISI-ANDES, fue utilizado para éste propósito. El período de tiempo contemplado para esta modelación abarca desde 1997 hasta 2011. Los registros históricos de 1997 corresponden a la misión TERRA financiada por RECOPE-MINAE (MINAE-CENIGA 1998). Las imágenes de alta resolución de ésta misión, fueron cedidas al CIVCO mediante convenio con RECOPE. A partir de allí se ortorectificaron con base en un modelo de elevación digital

(DEM) a 5m generado con los datos de la cartografía PRUGAM 2005 y procesado en el GIS ILWIS. El uso del suelo para 1997 se determinó readecuando las capas vectoriales (poligonales) de uso de suelo propuestas por PRUGAM en 2005. En ese sentido, cada polígono de 2005 fue manualmente comparado con su respectiva ortofotografía de 1997 y sus vértices readecuados para representar el uso que existía en el momento (Figura 15). La misma reclasificación de usos utilizada en la estimación de parámetros de SWMM fue utilizada para reclasificar los usos de 1997 a 8 clases relevantes (Cuadro 4). En el caso de 2011, se utilizaron las imágenes ortorectificadas que se generaron a partir de las imágenes multispectrales del satélite WorldView-2 (Figura 16). El procedimiento de readecuación y consiguiente determinación del uso del suelo obedeció el mismo procedimiento utilizado para las imágenes de TERRA de 1997.

El modelo MSSCUS se ejecutó en tres fases generales. En la primera fase, se determinó la probabilidad de transición de los diferentes usos / objetivos para simular la situación al año 2025 sobre la base del periodo 1997-2011 mediante el método de las cadenas de Markov. Dado que cada uso en el periodo 1997-2011, representa un objetivo en sí para el modelo Markov-CA-EMC, es necesario alimentar al mismo con factores y pesos relativos ligado a cada objetivo desde el punto de vista tipológico. El resultado de las cadenas de Markov son las matrices de probabilidad de transición considerando los 14 años comprendidos entre 1997 y 2011. Dichas matrices expresan la probabilidad de que un pixel de una categoría determinada a cambie a otra clase o se mantenga constante en el próximo período de tiempo.

En la segunda fase, se aplicó el método de evaluación multi-criterio/ multi-objetivo (EMC) incluido en IDRISI-GIS y propuesto por Barredo (1996) y Eastman (2003). Este método permite asignar los posibles usos / objetivos considerando un conjunto de factores de peso ponderados de acuerdo a su importancia relativa. El Cuadro 4, muestra los factores y restricciones que se utilizaron para cada objetivo. Es importante mencionar que los objetivos 9 (pastos) y 8 (invernaderos) fueron finalmente fundidos en el objetivo 7 (cultivos). Los factores de peso se centraron en los Índices de Fragilidad Ambiental (IFAS) adoptados por SETENA y PRUGAM y propuestos originalmente por el Dr. Allan Astorga (MINAE 2008).

La propuesta de plan regulador para los cantones de Cartago, Oreamuno, Paraíso y El Guarco también fueron tomados como factores. Estos últimos con mayor peso relativo que los IFAS dado que en sí incorporan el factor político-administrativo. Los factores corresponden a criterios que determinan la mayor o menor aptitud que tiene cada pixel para un uso de suelo /objetivo definido. Cada factor se expresa a nivel de mapa raster en resoluciones de 8 bits (0 nula aptitud a 255 máxima aptitud). Algunos mapas son de carácter booleano (0 nula aptitud y 1 máxima aptitud). IDRISI define estos mapas como mapas de “viabilidad” (suitability-maps). La Figura 17, muestra los mapas booleanos y continuos para 3 objetivos específicos. El método también considera restricciones geográficas o blanqueos de carácter booleanas, que limitan el análisis a un área geográfica particular (Cuadro 4).

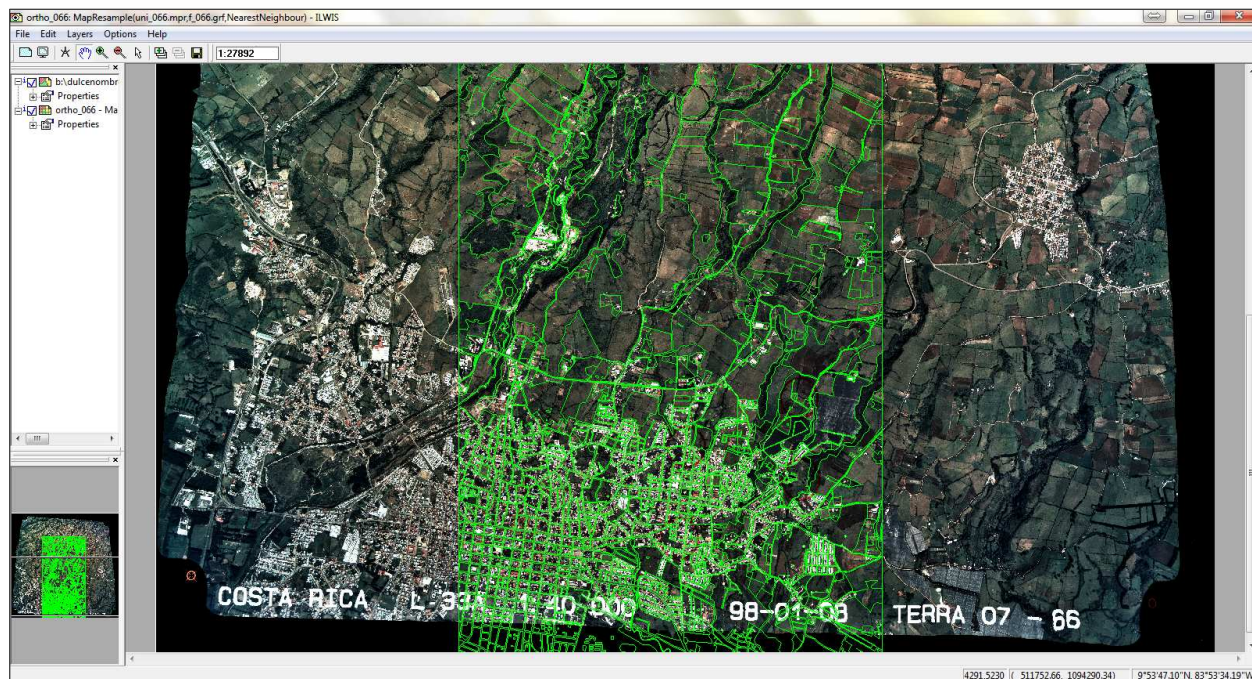


Figura 15. Comparación entre ortofotografía TERRA de 1997 y polígonos de uso (en verde) de PRUGAM 2005.

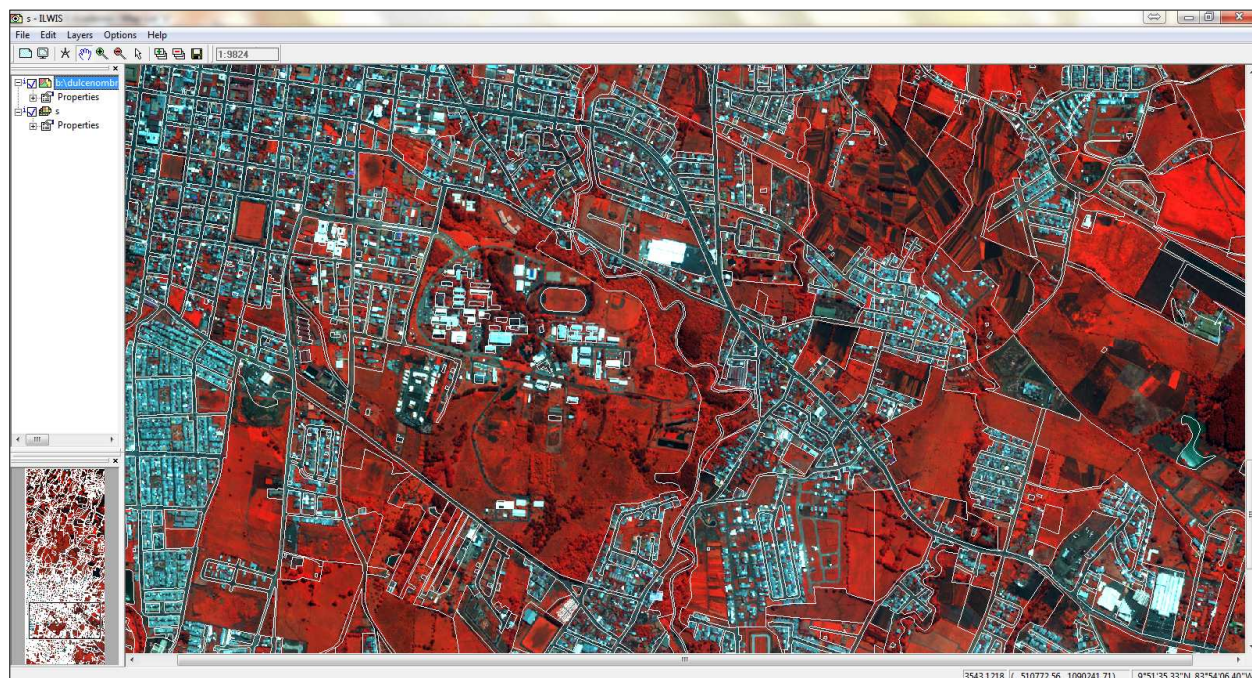


Figura 16. Comparación entre imágenes infrarroja WorldView-2 de 2011 y polígonos de uso (en blanco) de PRUGAM 2005.

Tipo Clase	Nomeclatura	Resolución (bits)	Factores	Restricciones
Residencial alta densidad	HDRES	0_255	IFA_GEO_RES	WATERCON
		0_255	IFA_BIO	HDLANDCON
		0_255	IFA_EDA	PROTECCON
		0_255	IFA_ANTRO	
		metros	ROADDIST	
		minutos	TOWNDIST	
Residencial media densidad	MDRES	0_255	IFA_GEO_RES	WATERCON
		0_255	IFA_BIO	MDLANDCON
		0_255	IFA_EDA	PROTECCON
		0_255	IFA_ANTRO	
		metros	ROADDIST	
		minutos	TOWNDIST	
Comercial	COMER	0_255	MASTER_COMER	WATERCON
				PROTECCON
Industrial	INDUS	0_255	MASTER_INDUS	WATERCON
				GELANDCON
Transporte	TRANS	0_255	WorldView-2	PROTECCON
Protección	PROTEC	0_255	IFA_GEO_PRO	
		0_255	IFA_BIO	PROTECCON
		0_255	IFA_EDA	
		0_255	IFA_ANTRO	
Cultivos	CROPS	0_255	IFA_GEO_AGRI	WATERCON
		0_255	IFA_BIO	GELANDCON
		0_255	IFA_EDA	PROTECCON
		0_255	IFA_ANTRO	
		minutos	TOWNDIST	
Invernaderos	GREEN	BOOLEAN	AGUA	
Residencial baja densidad	LDRES	0_255	IFA_GEO_RES	WATERCON
		0_255	IFA_BIO	LDLANDCON
		0_255	IFA_EDA	PROTECCON
		0_255	IFA_ANTRO	
		metros	ROADDIST	
		minutos	TOWNDIST	
Pastos	PASTURE	0_255	IFA_GEO_AGRI	WATERCON
		0_255	IFA_BIO	GELANDCON
		0_255	IFA_EDA	PROTECCON
		0_255	IFA_ANTRO	
		minutos	PLANTDIST	

Nomenclatura:

IFA_GEO_RES:	IFA de geoaptitud
IFA_BIO:	IFA de bioaptitud
IFA_EDA:	IFA de edafoaptitud
IFA_ANTRO:	IFA de antropaptitud
ROADDIST:	Distancia a red de transporte
TOWNDIST:	Distancia a centro de población
WATERCON:	Restricción de expansión en cuerpos de agua
PROTECCON:	Restricción de expansión en zonas de protección

Cuadro 4. Factores de peso y objetivos utilizados en el modelo Markov-AC.

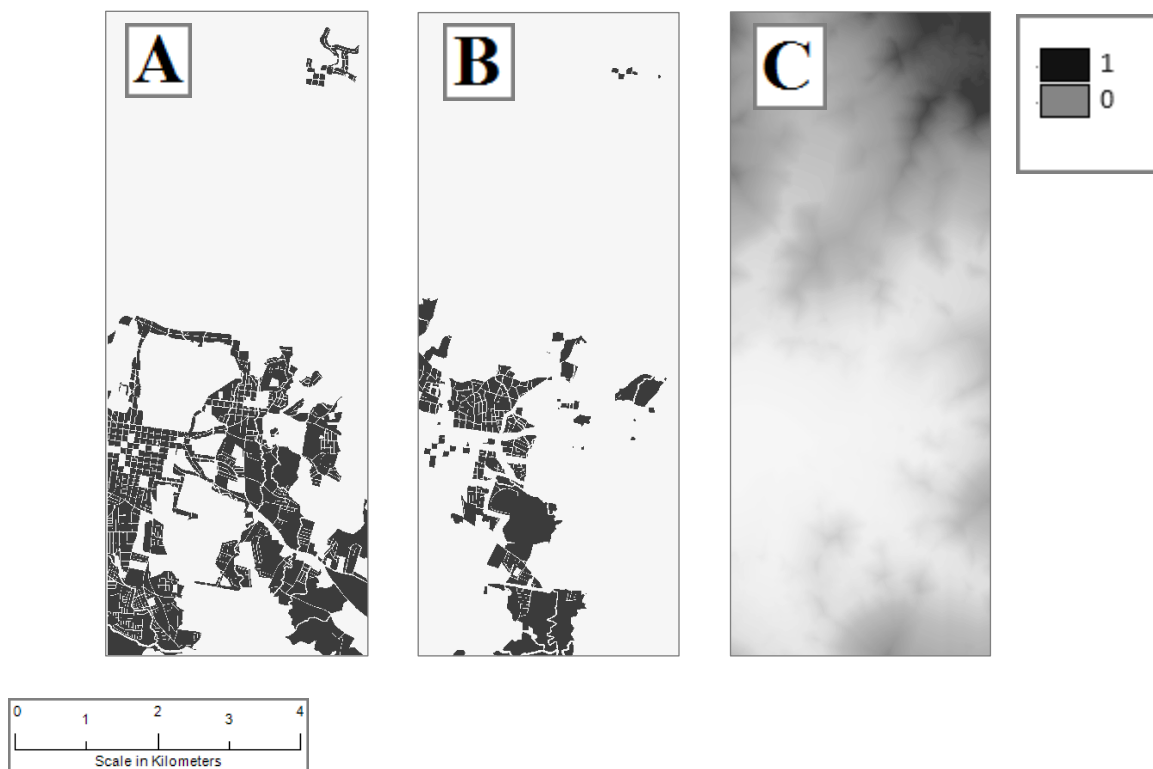


Figura 17. Mapas booleanos y continuos de factores asociados al modelo Markov-CA, HDRES (A), MDRES(B) y ROADDIST (C).

En la última fase, se ejecutó el modelo del Automata Celular (AC) tomando como datos de entrada las matrices de probabilidad de Markov y las EMC de cada uso /objetivo. El AC es un agente u objeto que tiene la habilidad de cambiar su estado, basado en la aplicación de una regla que relaciona el nuevo estado con su estado previo y la situación de pixeles vecinos (Eastman 2003). Es un sistema dinámico discreto que se desarrolla en el espacio y tiempo, compuesto por pixeles, cuadrículas, vecinos y reglas. Los vecinos son los pixeles que determinan el estado de una celda; y las reglas definen el estado de la celda para el próximo período. En el caso de las simulaciones realizadas se utilizó el vecino (o filtro) de Von Neumann, aplicado por defecto en el módulo CA_MARKOV de IDRISI.

3 CONFIGURACION DEL MODELO

Datos de Entrada

Trece eventos tormentas, ocurridas entre Septiembre y Noviembre de 2011, fueron utilizados en el proceso de optimización de SWMM. De las 13 tormentas, 10 fueron utilizadas en calibración y 3 en validación. Tres estaciones meteorológicas DAVIS Vantage Pro-2 fueron instaladas en sitios estratégicos del área de estudio (Figura 18). Una estación está ubicada en el campus central del ITCR, otra está ubicada en Llano Grande de Cartago y la tercera estación quedó instalada en la finca de Linda Vista S.A en Barrancas de Guarco. Esta última, a pesar de estar fuera del área de influencia de las cuencas del Toyogres y Zopilote, es determinante en el futuro estudio del agua Caliente y del Navarro. Con éste panorama, las modelaciones del SWMM solo toman en cuenta los datos de la estación ITCR y Llano Grande. Todas las estaciones están conectadas a una computadora (propiedad del ITCR) y transmiten minuto a minuto los datos a dos locaciones, uno al servidor de Web del Ambiente de la UCR y el otro a una cuenta abierta de Dropbox, con lo que los datos quedan respaldados en diversos sitios. Las estaciones empezaron a operar y transmitir datos exitosamente desde principios de septiembre de 2011. Al inicio, se experimentaron diversos problemas técnicos ligados a la tecnología de comunicación de las estaciones y su protocolo de migración de datos, más luego de mucha experimentación, estos problemas se resolvieron satisfactoriamente. En éste sentido la instalación de las estaciones fue más sencilla que al inicio mismo del proyecto. Las estaciones actuales pueden ser vistas en línea libremente a través de la web-del-ambiente en las siguientes direcciones web:

Estación ITCR:

http://www.webdelambiente.com/Meteorologia/Estaciones/30101_oriental/30101_oriental.htm

Estación Llano Grande:

http://www.webdelambiente.com/Meteorologia/Estaciones/30110_llano/30110_llano.htm

Estación Barrancas:

http://www.webdelambiente.com/Meteorologia/Estaciones/30803_tobosi/30803_tobosi.htm

La Figura 19, muestra la interface de lectura de datos de las estaciones meteorológicas DAVIS. La información se toma con un intervalo de 1 minuto en incluye sensores de precipitación, dirección/velocidad de viento, humedad/temperatura, radiación, luz ultravioleta y humedad de suelo. Cada estación y PC cuenta con un data-logger y una UPS que garantiza al menos 4 horas de soporte en el caso de un fallo eléctrico. Como se mencionó en anteriores ocasiones, los equipos están en lugares seguros y con acceso a Internet, lo cual no es sencillo de conseguir.

Respecto a la medición del flujo y posterior construcción de los hidrogramas observados, 4 sensores de nivel HOB0, modelo U20 fueron instaladas tanto en el cauce del río Toyogres como en el de la quebrada Zopilote (Figura 18). El del río Toyogres, fue instalado en la Finca de la empresa Linda Vista S.A, en Dulce Nombre de Cartago, contiguo a un puente interno que se extiende sobre el cauce del río.

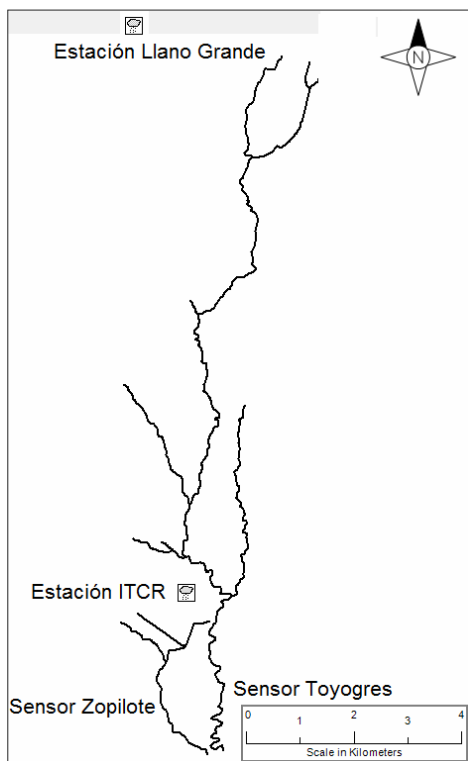


Figura 18. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas y sensores de nivel del proyecto.

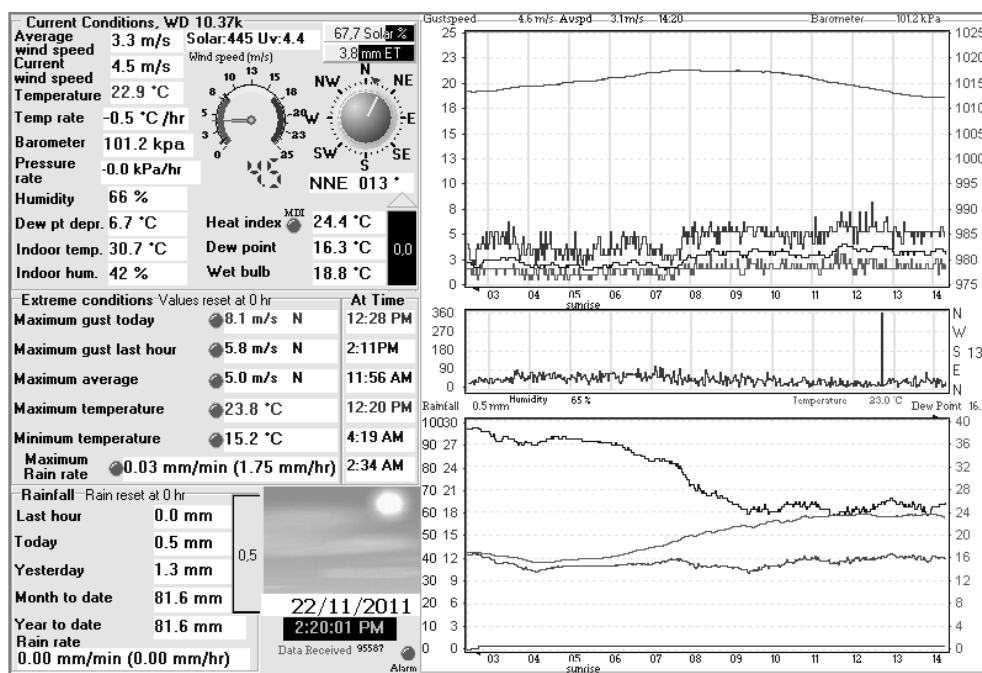


Figura 19. Interface de lectura de datos de las estaciones meteorológicas DAVIS.

Muchos otros sitios fueron estudiados pero ninguno poseía los atributos necesarios de facilidad de instalación, lectura y ante todo seguridad. Se firmó un convenio de cooperación con la empresa Linda Vista S.A, el cual ya está en vigor. El segundo sensor de nivel fue instalado contiguo al puente sobre el río Zopilote a la altura de Almácigos de Linda Vista. Ambos quedaron instalados y tomando datos de nivel a partir de la segunda semana de Agosto de 2011. Estos sensores están programados para tomar lecturas de nivel cada 10 min. Los mismos deben ser inspeccionados y sus datos descargados cada 30 días por motivos de seguridad. Sin embargo, su data-logger interno puede almacenar datos por aproximadamente 45 días. Dado que los sensores registran presión total, deben existir dos sensores en cada locación, uno para medir presión barométrica y otro sumergido para medir presión total. La Figura 20, muestra la interface de análisis de HOBO donde pueden apreciarse las series de datos correspondientes a presión absoluta (negro-gris), nivel del sensor (verde) y temperatura (azul) para un lapso de tiempo comprendido entre Noviembre de 2011 y Enero de 2012 para el sensor sobre el río Toyogres.

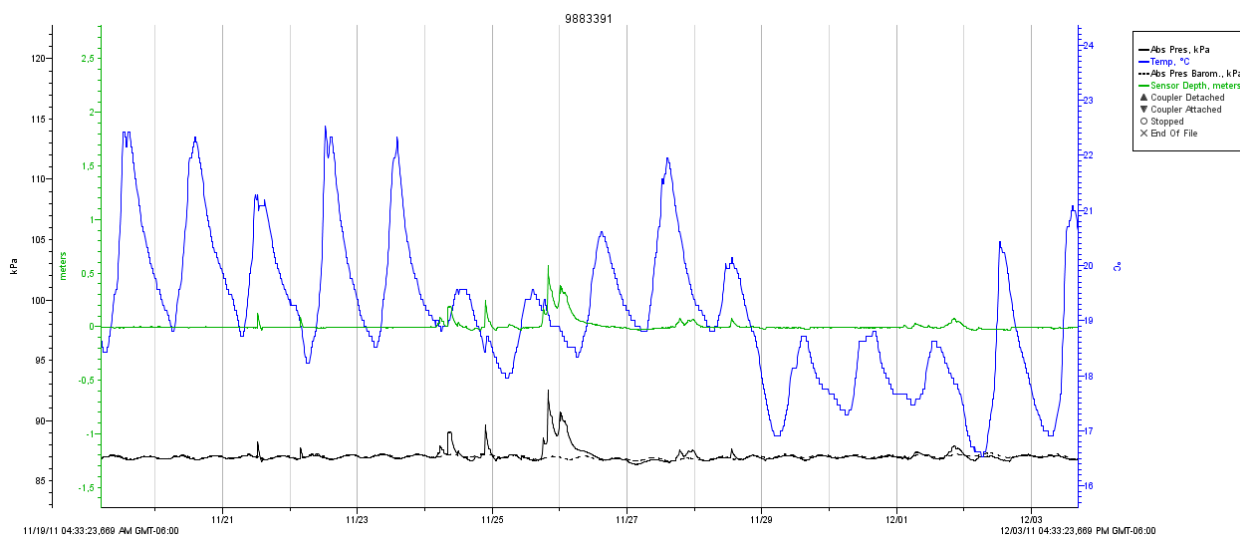


Figura 20. Serie temporal registrada de los sensores HOBO sobre el río Toyogres.

Los datos de nivel en los sensores, deben ser correlacionados con la velocidad de flujo propia en los cauces. La velocidad y por ende el caudal deben ser medidos puntualmente in-situ con un correntómetro. Para ello, se adquirió un correntómetro digital tipo USGS (United States Geological Survey por sus siglas en inglés), con todos los equipos y accesorios necesarios para garantizar el mínimo grado de seguridad ligado a la toma de datos durante crecidas y eventos fuertes de precipitación. Este correntómetro fue utilizado para inferir caudal, tanto en el cauce del Toyogres como en el del Zopilote, ambos durante dos eventos de precipitación de alta intensidad (arriba de 75 mm/h) ocurridos durante Octubre de 2011.

Configuración de SWMM

La compilación del modelo SWMM utilizada en éste estudio, corresponde a la 5.0.022 distribuida por la USEPA. El modelo de tránsito hidráulico utilizado fue el de Onda Cinemática con un intervalo de cálculo hidráulico de 10 segundos. Los archivos de salida propios de SWMM fueron programados para una discretización temporal de 10 minutos, dado que las observaciones de los sensores HOB0 se tomaron precisamente cada 10 minutos. En el caso de existir condiciones de flujo a presión (sobre todo en secciones de tuberías pertenecientes al sistema de drenaje de la quebrada Zopilote) se utilizó el modelo de Hazen-Williams para la descripción de las pérdidas de energía. Otro aspecto importante de mencionar es que a cada nudo en la red de drenaje de ambos cauces, se le permitió un cierto volumen de inundación (del inglés Pounding). El volumen de inundación es un atributo que SWMM otorga a sus nudos en el caso de existir presurización y posterior inundación y desbordamiento de flujo en los nudos. Aún cuando este volumen no existe en la realidad, resulta indispensable contemplarlo. De no ser así, en el caso de existir inundación, el volumen inundado sale del sistema y no puede ser recuperado; con lo que el balance de masas se ve alterado y SWMM se ve imposibilitado de llegar a una respuesta lógica. Es una práctica común, que en el caso de sistemas de alcantarillado con predisposición de inundación y reflujo presurizado se construyan bahías de retención o lagunas de ecualización que permitan almacenar la escorrentía y luego liberarla al sistema nuevamente de forma gradual. Es claro que el sistema de drenaje de la cuenca del Zopilote no cuenta con tales facilidades. Al tratarse de un modelo de análisis de tormentas, la evapotranspiración diaria y el flujo de caudal base, no fueron tomados en cuenta. La inclusión de los parámetros ligados al modelo de humedad de suelo de SWMM o SMA (Soil Moisture Accounting por sus siglas en inglés) va más allá de los alcances de este proyecto, puesto que requeriría de la disponibilidad de datos observados de nivel freático, los cuales no están disponibles.

Configuración de PEST

Ocho grupos de parámetros, cuya respuesta determinan el tamaño, la extensión y la geometría de los hidrogramas, fueron elegidos para la calibración de SWMM con PEST (Cuadro 5). Los rangos de variación de cada parámetro fueron restringidos de acuerdo a valores físicamente realistas tomados de la literatura (*).

Tres de estos grupos están relacionados al modelo de onda cinemática de Manning (rugosidades), dos más; están ligados al almacenamiento en depresión mientras que los restantes tres parámetros tienen que ver con las pérdidas por infiltración. Como se mencionó en la sección de introducción, con el objeto de disminuir el número de incógnitas y mejorar la confiabilidad sobre las predicciones del modelo, se procedió a restringir el espacio paramétrico de SWMM definiendo grupos de parámetros “agregados” y “distribuidos”. Los parámetros agregados se consideran espacialmente homogéneos, por lo que comparten el mismo valor independientemente de su posición geográfica. Los parámetros distribuidos por su parte, se consideran no-homogéneos, por lo que su valor varía a nivel de subcuenca. Solo 3 grupos de parámetros fueron

definidos como distribuidos; aquellos ligados al modelo de pérdidas por infiltración de la SCS (pimp, cn, y widt). Consecuentemente, estos 3 grupos de parámetros representaron 165 parámetros ajustables, mientras que los restantes 5 grupos de parámetros representaron un parámetro cada uno, para un total de 170 parámetros ajustables.

Parametro	Nomenclatura	Transformación	Carácter	Valor inicial	Valor mínimo	Valor máximo
Rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable	* nimp	Logarítmico	Agregado	0.012	0.010	0.015
Rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área permeable	* nper	Logarítmico	Agregado	0.050	0.040	0.200
Lámina de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable	* dimp	Lineal	Agregado	1.000	0.300	2.500
Lámina de almacenamiento en depresión sobre el área permeable	* dper	Lineal	Agregado	3.000	2.500	5.500
Rugosidad de Manning para tránsito hidráulico	* ncha	Logarítmico	Agregado	0.015	0.010	0.030
Porcentaje de área impermeable	pimp	Lineal	Distribuido	Rango	-30%	30%
Número de curva SCS-CN	cn	Lineal	Distribuido	Rango	-10%	10%
Ancho característico del plano del modelo cinemático	widt	Logarítmico	Distribuido	Rango	-20%	20%

*

Huber y Dickinson (1988)
 Tsihrintzis y Hamis (1998)
 Wanielista y Yousef (1993)
 Chow et al. (1988)
 Mays (2001)

Cuadro 5. Grupos de parámetros de SWMM elegidos para la calibración con PEST.

Una primera tormenta fue utilizada para cuantificar la sensibilidad de los parámetros distribuidos. Luego de ello, se tomaron medidas para reducir aún más el espacio paramétrico del SWMM. Con el objeto de permitir que PEST trabajase en igualdad de condiciones, cada tormenta analizada y calibrada de forma independiente, inició el proceso de optimización con los mismos valores-iniciales estipulados en el Cuadro 5. La idea detrás de éste razonamiento, es permitir a PEST encontrar el mínimo absoluto del espacio paramétrico como función de cada tormenta en igualdad de condiciones partiendo de un mismo set de parámetros iniciales. Dependiendo del papel que cada parámetro juega en la estructura interna del modelo, su transformación matemática se definió como lineal o logarítmica. Lo anterior, permite una mayor eficiencia en el proceso de inversión en PEST. Finalmente, las observaciones de caudal obtenidas en ambas estaciones de flujo (Figura 18) fueron pesadas con el mismo peso relativo, en este sentido, el flujo base y los caudales picos compartieron el mismo peso relativo (ec (14)).

4_RESULTADOS Y ANALISIS

Generación de Modelos de Elevación Digital (DEMs)

Las Figuras 21_A y 21_B muestran una comparación cualitativa entre contornos (curvas de nivel) a cada 50 m entre los datos de las imágenes WorldView-1 2011 y CARTA-2005. El intervalo de 50 m es para propósitos ilustrativos únicamente. En apariencia, existe una buena coincidencia entre los sets de curvas para las zonas montañosas y áreas de mayor elevación en el norte de la zona estudio por arriba de los 2000 msnm.

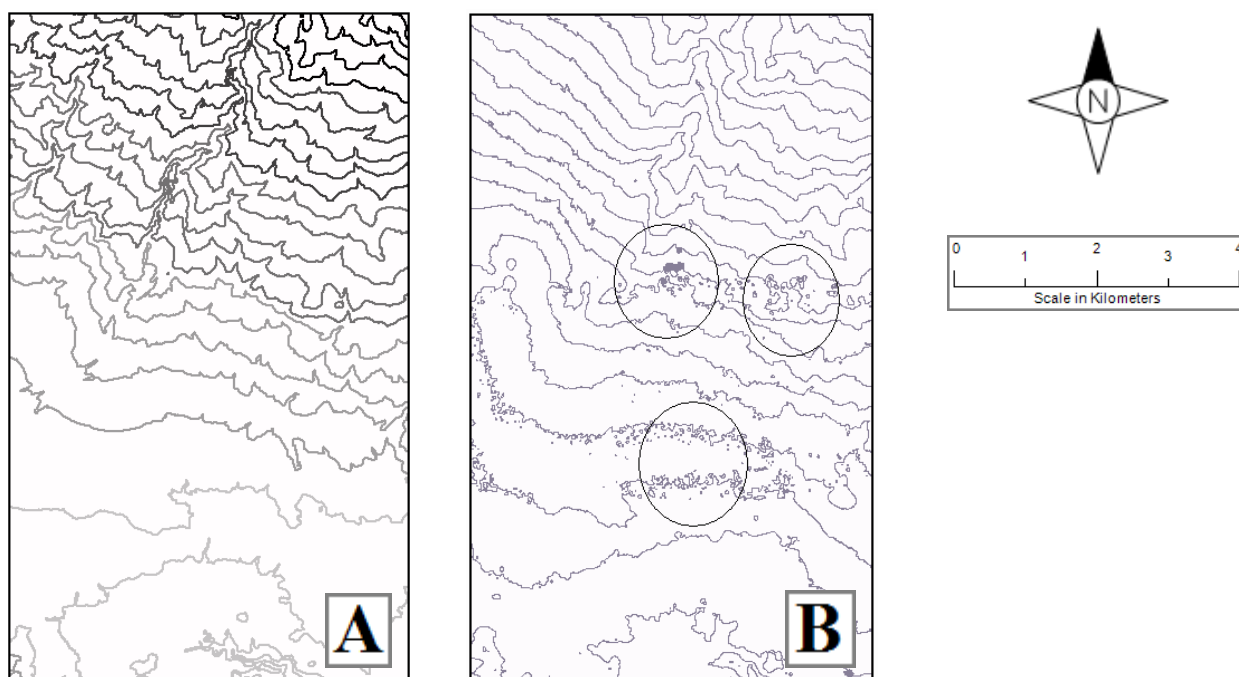


Figura 21. Comparación cualitativa entre contornos (curvas de nivel) a cada 50 m entre los datos de las imágenes WorldView-1 2011 y CARTA-2005.

No obstante, conforme los contornos descienden a altitudes más cercanas hacia las zonas urbanas (por debajo de los 1500 msnm), los datos correspondientes a las imágenes CARTA exhiben un comportamiento errático, con áreas de alta densidad de depresiones en terreno (marcadas en círculos en la Figura 21_B). Estos cúmulos o “clusters” son de naturaleza aparentemente artificial y están relacionadas propiamente con la calidad de las imágenes utilizadas.

A partir de la primera revisión de los vuelos fotogramétricos entregados por PRUGAM en relación al CARTA-2005, se tomó conciencia de las graves diferencias radiométricas existentes entre las fotografías del vuelo en cuestión. Esto motivó a la necesidad de modificar metodologías y procedimientos previos con el fin de conseguir los resultados esperados a partir del material de entrada. Lo anterior incluyó la extracción de las

bandas roja, azul y verde de cada fotografía aérea y su posterior compensación radiológica. En general, fue imposible aplicar la técnica de correlación automática de puntos de paso; puesto que las diferencias radiométricas entre imágenes eran tal que no existía correlación entre las matrices de búsqueda. En los casos más extremos se dificultaba incluso la identificación manual de puntos homólogos en las imágenes contiguas. Se sospecha que buena parte de las deficiencias mostradas por estas imágenes están principalmente relacionadas con el proceso de escaneo o digitalización de las imágenes análogas originales tomadas con la cámara RC-30. Dicho proceso de digitalización fue dirigido y ejecutado en el CENAT. Desafortunadamente, los negativos originales de tales fotografías no estaban disponibles al momento que se consultó al CENAT.

Wilkie (1990), Baltasvias & Stallmann (1993) y Cuartero *et al.* (2004), discuten ampliamente los problemas asociados a la aerotriangulación de imágenes adquiridas a partir de vuelos aéreos, destacando la dificultad de ubicar GCPs en imágenes estéreo, la existencia de diferencias radiológicas entre las imágenes, debido a la toma de datos en diferentes fechas y a diferentes horas del día con diferente grado de iluminación e incidencia solar.

A manera de contraste, los contornos producidos con las imágenes satelitales del WorldView-1 muestran un comportamiento mucho más estable sin la presencia de zonas particularmente ruidosas. En buena medida, esto es atribuible a una superior calidad de la información espacial y a un mejor protocolo de orientación externa. ERDAS-LPS contiene densas bases de datos ligadas a los atributos de orientación interna de la constelación de satélites WorldView. Al tratarse esencialmente de dos imágenes- únicamente tomadas desde dos diferentes ángulos en el mismo momento y con las mismas condiciones de iluminación, el error o las incidencias asociadas al proceso de aerotriangulación analítica digital (AAD) y ante todo, ubicación de los GCP's es mucho más precisa. Lo anterior contrasta con lo establecido por Subramanian (2003) en su estudio comparativo de varios fuentes de información (aérea y satelital) para la creación de DEMs. Uno de los problemas ligados a la orientación interna de las imágenes CARTA, tiene que ver con el certificado de calibración original de la cámara RC-30 que de acuerdo a BLOM (PRUGAM 2008), parece no corresponder a la supuestamente utilizada en el vuelo.

A partir de este momento, y con el objeto de prevenir que los problemas inherentes de las imágenes CARTA fueran transmitidos a los DEMs, se tomó la decisión de rechazar los modelos creados con CARTA y concentrarse únicamente con los generados con la información de WorldView-1. Desde el punto de vista cuantitativo, el Cuadro 6 muestra las cifras relacionadas al RMSE en los DEMs generados a partir de las imágenes WorldView-1 2011 para las resoluciones de 10, 5 y 2 m respectivamente. Puede notarse que para todas las resoluciones probadas, el RMSE está por debajo del umbral de 1.5 m originalmente adoptado para evaluar la precisión de la elevación en la vertical, por lo que todos los DEMs se consideran aptos para su post-procesamiento en ILWIS.

Resolución DEM (m)	RMSE (m)	GCPs
2	0.809	18
5	1.121	18
10	1.378	18

Cuadro 6. Control de calidad de los DEMs generados a partir de las imágenes WorldView-1 2011.

Hidroprocesamiento

Tal y como se mencionó en la sección de metodología, cada uno de los modelos de elevación digital DEM (Figura 22_A) fue optimizado mediante el “quemado” del mapa de callejos, escala 1: 10 000 PRUGAM (Figura 22_B) para forzar al algoritmo en que la dirección y acumulación de flujo obedeciese de una forma representativa las líneas de flujo preferenciales, que las calles representan sobre la conducción y canalización de la escorrentía superficial. Lo anterior se hizo de manera tal que la deducción del mapa de pendientes (Figura 22_C), uno de los parámetros clave en el modelo de onda cinemática de SWMM, fuera lo más representativa posible; ya que el parámetro de pendiente no pretendía ser tomado en cuenta en el proceso de calibración. La lógica detrás de este argumento, es el hecho de que se cuenta con información espacial de alta resolución, en este caso, los DEMs generados a partir de las imágenes WV-1.

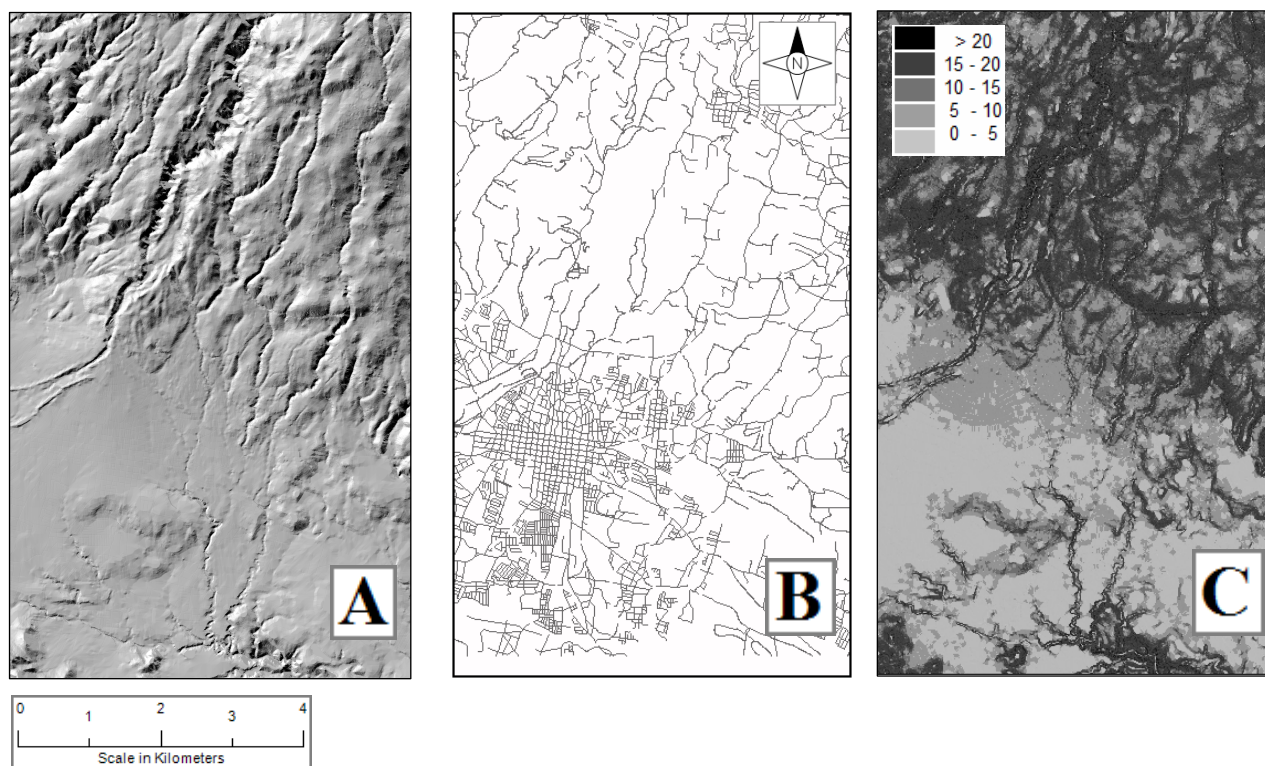


Figura 22. WorldView-1 DEM a 2 m, mapa de callejo-PRUGAM y mapa de pendiente-ILWIS generados para el área de estudio.

La Figura 22_C, muestra como resultado, que para el área en estudio, se alcanzan pendientes muy superiores al 20%; lo que de antemano supone condiciones de flujo hidráulico netamente supercríticas.

Otro de los objetivos del estudio, era determinar con la resolución espacial de los diferentes DEMs podría eventualmente alterar la discretización y parameterización de SWMM, principalmente en aspectos ligados a las condiciones de frontera y extensión del dominio físico del modelo. Para ello, el primer DEM generado con una resolución de 2 m fue posteriormente re-muestreado a 5 y 10 m respectivamente. Tal y como lo sugiere Moore *et al.* (1991), la disminución de la resolución espacial de un modelo de elevación (aumento del tamaño del pixel o celda) a partir de un método de re-muestreo, implica una pérdida significativa de detalle e información, al existir un claro proceso de generalización y agregación de la información espacial. Esto es particularmente cierto para áreas urbanas, donde estructuras de control de significancia hidráulica (e.g. puentes, pozos de registro, etc.) podrían no ser tomadas en cuenta y se utiliza un tamaño de pixel similar a las dimensiones propias de la estructura. Este es un problema de escala, claramente expuesto por Bloschl & Sivapalan (1995) en su tratado de análisis de escala en modelos hidrológicos. Experimentos preliminares sobre la cuenca del Toyogres con los DEMs de 2, 5 y 10 m fueron ejecutados haciendo uso del motor de hidroprocesamiento de ILWIS. Pudo notarse que la extracción de la red de drenaje y consecuente las condiciones de frontera y extensión del dominio físico del modelo, resultaron particularmente sensitivas a la reclasificación del tamaño de pixel (Figura 23_A). Por ejemplo, la Figura 23_B, con una resolución de 10m, sugiere un área tributaria al río Toyogres, mucho mayor a aquella sugerida por la Figura 23_C, esta última, con una resolución de 2m.

Claramente, la pérdida de detalle afecta significativamente el juicio del modelo de hidroprocesamiento utilizado. Consecuentemente, y para efectos prácticos, 2 m fue la resolución utilizada en el resto de las tareas de parameterización de SWMM. Lo anterior concuerda en buena medida con lo encontrado por Park *et al.* (2008) en su estudio del efecto de agregación espacial sobre los procesos de escorrentía en alcantarillados pluviales modelados con SWMM. En su caso, Park *et al.* (2008) encontró que el nivel de discretización espacial en cuencas y subcuencas, solo es relevante en el tanto que haya mayor inclusión o exclusión de área contributiva, más no la cantidad de áreas tributarias o subcuencas. Esto es seguro bajo las condiciones de su estudio, pero queda por demostrarse bajo condiciones de alta pendiente como las imperantes en las cuencas bajo análisis.

La Figura 24_A, muestra la extensión de las dos cuencas en estudio. Como logra notarse (Cuadro 9), la cuenca de la quebrada Zopilote (239 ha) es apenas una fracción del área correspondiente al río Toyogres (1220 ha), razón por la cual, se utilizaron diferentes umbrales de acumulación en ambas cuencas. Las Figuras 24_B y 24_C ilustran respectivamente la extensión de las redes de drenaje y la distribución de subcuencas por cuenca. Bajo cualquier circunstancia, una geometría por demás alargada puede ser observada en casi cualquier subcuenca independientemente si se trata del Toyogres o el Zopilote (Cuadros 7 y 8).

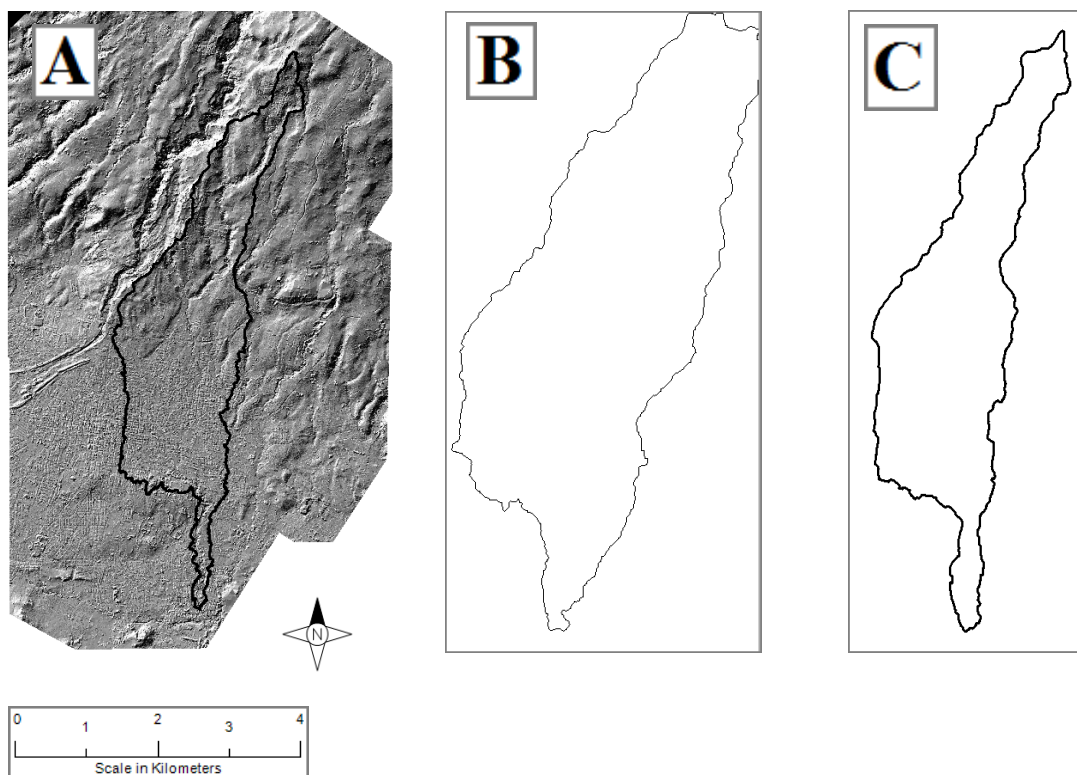


Figura 23. Áreas tributarias sugeridas para la cuenca del río Toyogres con base a diferentes resoluciones espaciales.

Esto puede ser explicado en parte a partir del Índice de Forma (IF), el cual representa el cociente entre el ancho y el largo de una cuenca o área tributaria. En el caso del Toyogres, el IF promedio alcanza 0.12 con un coeficiente de variabilidad (CV) de 0.51. En el caso del Zopilote, el IF alcanza 0.21 ± 1.24 . Este último CV de 1.24, evidencia una geometría altamente heterogénea en la cuenca de la quebrada Zopilote. Otro factor que contribuye de manera importante a esta situación, es la pronunciada condición de pendiente imperante en la zona, imponiéndose un promedio de $24.3\% \pm 0.27$ como CV para la cuenca del Toyogres y $16.9\% \pm 0.42$ para el caso del Zopilote. En términos generales, los CVs de los parámetros espaciales en ambas cuencas, con valores cercanos al 50%, sugieren una alta variabilidad geomorfológica en las subcuencas. Lo anterior hace presumir comportamientos de generación y propagación de escorrentía muy variables entre sí, lo cual, en última instancia debería tener consecuencias a nivel hidráulico, principalmente en los tiempos y en crecimiento/descenso de los hidrogramas medidos por los sensores de nivel. Los porcentajes promedio de área impermeable en ambas cuencas ($27.2\% \pm 0.61$ y $23.6\% \pm 0.85$ de acuerdo a los Cuadros X1 y X2) evidencian una combinación de usos urbanos y agrícolas con profundas implicaciones hidrológicas (Figura 24_D). Es importante destacar que las subcuencas referidas desde SBcz_1 hasta SBcz_5 (Cuadro 8) correspondientes a la cuenca del Zopilote; fueron delineadas manualmente dada la presencia de infraestructura (principalmente líneas de alcantarillado pluvial) que no pudo ser reflejada por los algoritmos de hidroprocesamiento de ILWIS.

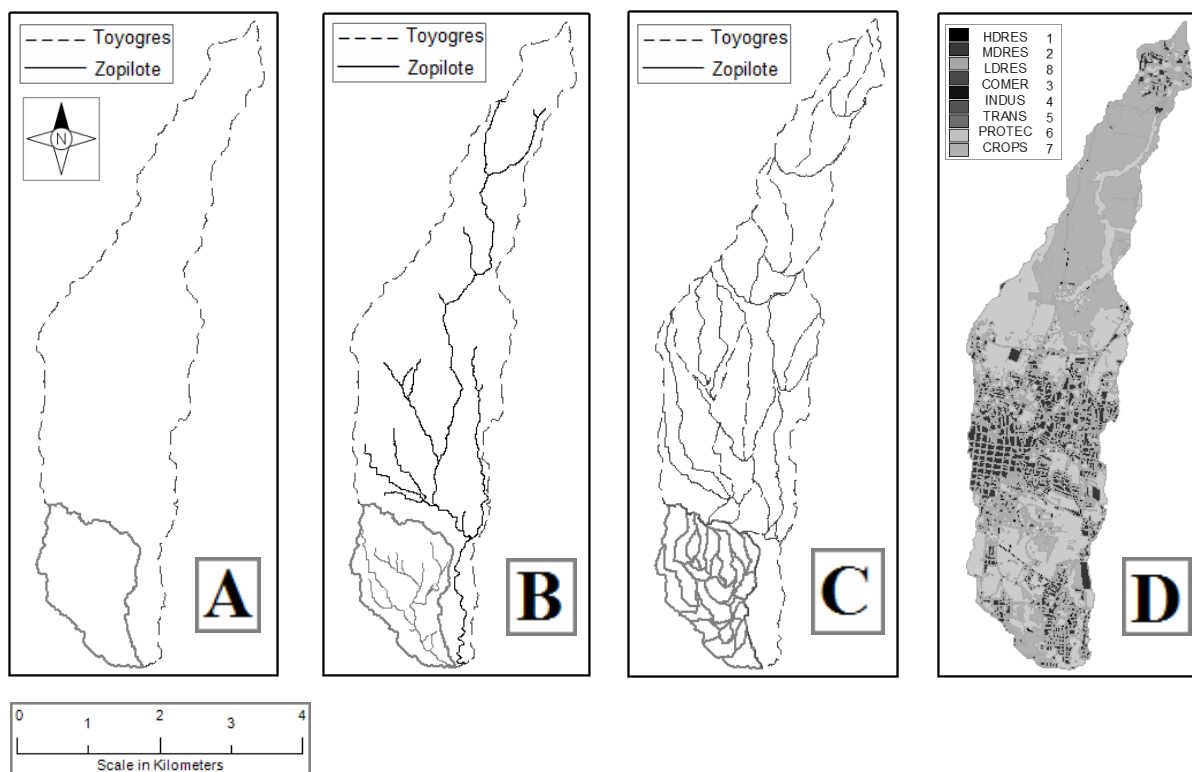


Figura 24. Delimitación, red de drenaje, subcuencas y mapas de uso de suelo subcuena para las cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote.

ID Subcuena	ID Cuenca	Area (ha)	Porcentaje de área impermeable (%)	Ancho del plano cinemático (m)	Índice de forma (-)	Pendiente (%)	Número de curva SCS-CN	Posición del centroide		
								Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
SBt_1	Toyogres	68.40	13.58	5508.00	0.09	27.50	65.88	510985.00	1095939.00	1980.00
SBt_2	Toyogres	28.93	31.57	3648.00	0.09	30.70	70.92	511978.00	1096496.00	2110.00
SBt_3	Toyogres	29.31	32.97	3041.00	0.13	29.10	71.37	511709.00	1096419.00	2088.80
SBt_4	Toyogres	56.10	4.76	4044.00	0.14	29.50	63.45	510424.00	1094319.00	1762.50
SBt_5	Toyogres	49.70	6.23	3421.00	0.17	31.00	63.45	510032.00	1093709.00	1699.24
SBt_6	Toyogres	65.86	13.23	4197.00	0.15	18.50	65.88	510688.00	1092589.00	1556.50
SBt_7	Toyogres	32.57	24.64	4092.00	0.08	18.60	69.12	509851.00	1092414.00	1523.99
SBt_8	Toyogres	43.40	16.59	3970.00	0.11	18.90	66.51	509224.00	1092574.00	1548.89
SBt_9	Toyogres	46.19	15.89	4214.00	0.10	20.80	66.33	509558.00	1092634.00	1557.12
SBt_10	Toyogres	26.85	20.30	3089.00	0.11	21.70	67.95	510964.00	1092304.00	1545.00
SBt_11	Toyogres	80.19	50.40	6938.00	0.07	19.50	76.86	509311.00	1091466.00	1464.06
SBt_12	Toyogres	56.54	50.96	7825.00	0.04	20.40	76.68	508965.00	1091451.00	1470.26
SBt_13	Toyogres	51.15	46.48	5101.00	0.08	21.10	75.24	508930.00	1090531.00	1428.42
SBt_14	Toyogres	51.41	46.20	5259.00	0.07	18.90	75.78	510352.00	1090814.00	1427.03
SBt_15	Toyogres	51.96	4.34	3534.00	0.17	26.20	62.55	511320.00	1095506.00	1965.77
SBt_16	Toyogres	64.34	42.77	6740.00	0.06	18.80	74.79	510629.00	1090854.00	1429.40
SBt_17	Toyogres	2.39	56.91	984.00	0.10	18.80	78.93	509529.00	1091751.00	1474.22
SBt_18	Toyogres	87.36	4.97	5260.00	0.13	29.00	62.82	510988.00	1094396.00	1806.00
SBt_19	Toyogres	65.66	45.92	4803.00	0.11	17.40	75.06	509904.00	1091681.00	1475.75
SBt_20	Toyogres	25.46	17.92	1873.00	0.29	25.30	66.78	510518.00	1093336.00	1625.00
SBt_22	Toyogres	82.53	29.19	7235.00	0.06	20.90	70.38	510302.00	1092166.00	1515.37
SBt_23	Toyogres	32.33	50.12	3303.00	0.12	19.00	77.13	509940.00	1090601.00	1418.47
SBt_24	Toyogres	10.76	13.16	1382.00	0.23	32.70	62.37	509801.00	1089899.00	1401.79
SBt_25	Toyogres	27.73	26.74	1983.00	0.28	27.00	67.68	510200.00	1089951.00	1395.63
SBt_26	Toyogres	2.80	19.04	833.00	0.16	45.50	65.52	510474.00	1089619.00	1379.14
SBt_27	Toyogres	79.91	21.84	5895.00	0.09	24.30	67.50	510376.00	1088624.00	1331.04
MAX		87.36	56.91	7825.00	0.29	45.50	78.93			
MIN		2.39	4.34	833.00	0.04	17.40	62.37			
PROM		46.92	27.18	4160.46	0.12	24.27	69.50			
SD		23.96	16.62	1887.23	0.06	6.45	5.24			
CV		0.51	0.61	0.45	0.51	0.27	0.08			

Cuadro 7. Parámetros desagregados por subcuena para la cuenca del río Toyogres.

ID Subcuenca	ID Cuenca	Area (ha)	Porcentaje de área impermeable (%)	Ancho del plano cinemático (m)	Índice de forma (-)	Pendiente (%)	Número de curva SCS-CN	Posición del centroide		
								Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
SBz_1	Zopilote	34.94	32.41	4127.00	0.08	16.20	71.55	508952.00	1089236.00	1378.10
SBz_2	Zopilote	14.49	11.41	2391.00	0.10	20.60	61.74	509966.00	1089344.00	1380.69
SBz_3	Zopilote	11.84	47.39	2006.00	0.12	17.00	76.05	509170.00	1089486.00	1399.14
SBz_4	Zopilote	7.79	31.78	1345.00	0.17	18.60	70.29	509458.00	1089436.00	1403.80
SBz_5	Zopilote	6.05	18.69	1143.00	0.19	15.70	67.23	509297.00	1089376.00	1390.00
SBz_6	Zopilote	8.23	12.67	1143.00	0.25	23.90	63.54	509573.00	1089299.00	1381.06
SBz_7	Zopilote	7.92	17.36	1584.00	0.13	23.10	63.72	510076.00	1088936.00	1347.20
SBz_8	Zopilote	11.29	13.65	1143.00	0.35	20.40	63.45	509779.00	1089196.00	1374.00
SBz_9	Zopilote	19.15	26.53	2631.00	0.11	14.10	69.66	508991.00	1088879.00	1369.12
SBz_10	Zopilote	6.01	14.63	1701.00	0.08	28.80	63.72	509996.00	1088996.00	1350.75
SBz_11	Zopilote	8.01	28.42	1184.00	0.23	17.20	69.84	509526.00	1088111.00	1327.94
SBz_12	Zopilote	9.34	45.99	2127.00	0.08	18.60	76.59	510037.00	1088196.00	1326.25
SBz_13	Zopilote	5.37	45.29	1780.00	0.07	16.00	75.78	509941.00	1088271.00	1327.96
SBz_14	Zopilote	3.82	52.78	1313.00	0.09	16.70	77.04	510110.00	1088794.00	1343.36
SBz_15	Zopilote	7.53	37.17	1499.00	0.13	15.10	72.45	509417.00	1088451.00	1333.05
SBz_16	Zopilote	1.70	8.47	566.00	0.21	31.20	60.21	509303.00	1089121.00	1370.20
SBz_17	Zopilote	1.38	48.02	716.00	0.11	17.50	76.68	509866.00	1088576.00	1334.33
SBz_18	Zopilote	5.32	20.37	1133.00	0.17	23.70	68.40	509374.00	1088986.00	1359.86
SBz_19	Zopilote	4.68	19.18	1143.00	0.14	20.20	66.78	509637.00	1089014.00	1357.46
SBz_20	Zopilote	10.86	14.56	1230.00	0.29	18.20	65.79	509703.00	1088731.00	1335.00
SBz_21	Zopilote	14.34	12.32	1238.00	0.37	15.60	65.61	509539.00	1088546.00	1332.35
SBz_23	Zopilote	4.46	13.09	926.00	0.21	16.10	65.79	509684.00	1088209.00	1320.83
SBz_24	Zopilote	9.94	10.85	1135.00	0.31	14.70	65.16	509700.00	1087876.00	1320.00
SBz_25	Zopilote	13.94	12.74	1725.00	0.19	28.30	65.97	510078.00	1087834.00	1316.38
SBcz_1	Zopilote	1.02	12.80	540.00	0.14	4.25	72.05	509396.00	1089210.00	1376.54
SBcz_2	Zopilote	0.76	11.52	440.00	0.16	5.42	72.00	509533.00	1089121.00	1369.01
SBcz_3	Zopilote	0.76	29.70	500.00	0.12	5.89	74.15	509642.00	1089164.00	1375.53
SBcz_4	Zopilote	2.75	16.90	1313.00	0.06	5.74	71.25	509774.00	1088954.00	1357.59
SBcz_5	Zopilote	4.11	18.00	330.00	1.51	2.29	80.55	509975.00	1088668.00	1338.11
MAX		34.94	52.78	4127.00	1.51	31.20	80.55			
MIN		0.76	8.47	330.00	0.06	2.29	60.21			
PROM		8.20	23.61	1381.10	0.21	16.93	69.42			
SD		6.94	13.48	773.06	0.26	7.14	5.30			
CV		0.85	0.57	0.56	1.24	0.42	0.08			

Tabla 8. Parámetros desagregados por subcuenca para la cuenca de la quebrada Zopilote.

ID Subcuenca	Area (ha)	Porcentaje de área impermeable (%)	Ancho del plano cinemático (m)	Índice de forma (-)	Pendiente (%)	Número de curva SCS-CN	Posición del centroide		
							Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)
Toyogres	1219.83	27.18	4160.46	0.12	24.27	69.50	509950.00	1092391.00	1356.65
Zopilote	237.80	23.61	1381.10	0.21	16.93	69.42	509556.00	1088766.00	1120.58

Cuadro 9. Parámetros agregados por subcuenca para las cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote.

Hidrogramas Observados

Tal y como se especificó en la metodología, las observaciones de caudal en los cauces es de carácter indirecta. Los sensores instalados en los puntos de concentración únicamente miden nivel piezométrico, el cual debe ser correlacionado con la velocidad de flujo mediante el correntómetro digital para finalmente correlacionar nivel con caudal. Las Figura 25 y 26 muestran las correlaciones entre niveles y caudales en los cauces del Toyogres y el Zopilote correspondientes a la tormenta T5. Como es de suponerse, los datos observados, que a su vez se utilizan en la calibración del modelo SWMM; no son perfectos y no están exentos de incertidumbre. La correlación en el caso del Toyogres alcanza un R2 de 0.93, mientras que para el Zopilote, el R2 alcanza 0.90. Existen diversas razones para que estas correlaciones no alcancen una armonía perfecta. Los sensores de nivel HOBO están instalados en puentes que están

expuestos a procesos de acumulación de basura y sedimentos que a la larga, alteran el perfil hidráulico de aproximación y salida de los puentes. Por otro lado, el fondo de los cauces es muy dinámico y cambiante; con lo que tienden a haber cambios temporales sobre el mismo que facilitan la presencia de rutas preferenciales de flujo que alteran las lecturas de los sensores. He de recordarse que los planteamientos que describen la hidráulica de flujo libre, resulta válidos esencialmente en secciones geoméricamente estables y controladas.

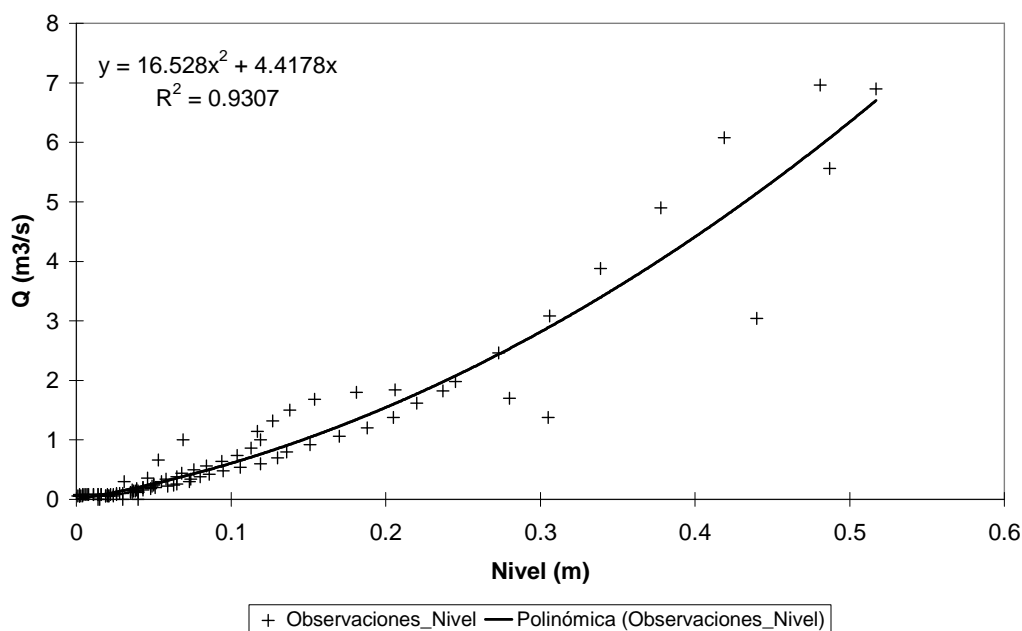


Figura 25. Correlación entre niveles y caudales en la cuenca del río Toyogres.

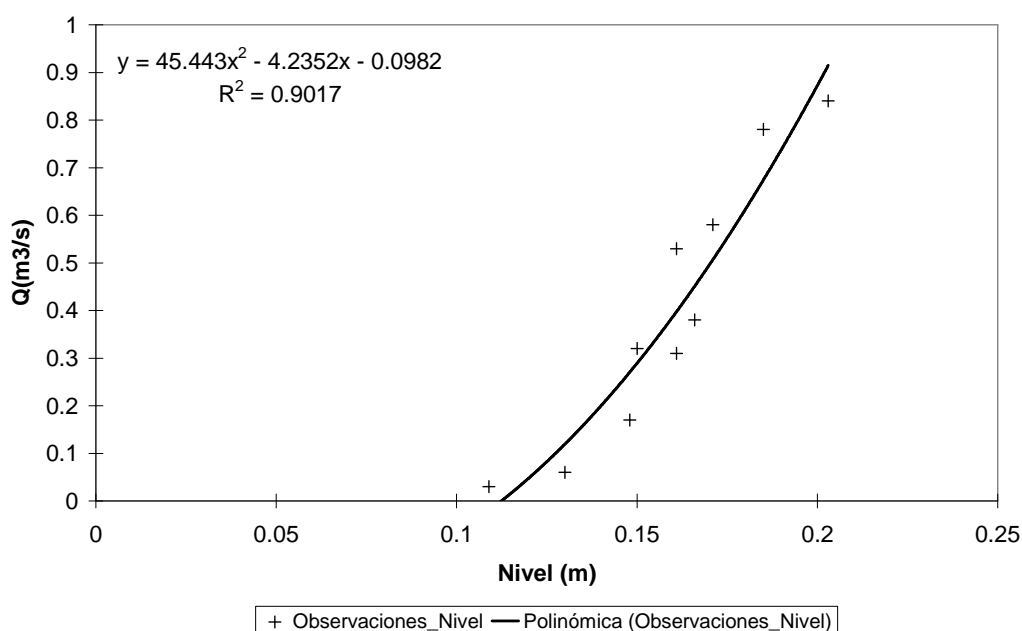


Figura 26. Correlación entre niveles y caudales en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Por lo anterior, es de esperarse que en una sección geoméricamente poco estable y con interferencias externas ausentes de control alguno; no se alcance una correlación perfecta entre las observaciones de nivel y las estimaciones de caudal basadas en la velocidad de flujo. Queda claro también que esta incertidumbre; asociada a las observaciones de nivel/caudal son posteriormente transferidas a los parámetros durante el proceso de calibración de SWMM.

Calibración de Tormentas

Todos los eventos de tormenta estudiados fueron capaces de producir una respuesta en los puntos de concentración ligados a los sensores de flujo. Los Cuadros 10 y 11 listan las tormentas analizadas por fecha, junto con su máxima intensidad en mm/hr/min y su volumen total precipitado en mm para las cuencas del Toyogres y el zopilote respectivamente.

Fecha	Tormenta	Vol. Prec (mm)	Max.Int (mm/hr)	Observado			Modelado			NS	Error relativo		
				V (m3)	P (m3/s)	Pt (min)	V (m3)	P (m3/s)	Pt(min)		Ev (%)	Ep (%)	Ept (%)
SEP-12-2011	T1	20.18	90.00	160441.24	13.71	410.00	128402.25	13.49	400.00	0.88	19.97	1.58	2.44
SEP-18-2011	T2	17.80	30.00	99787.76	13.40	80.00	96886.05	12.22	80.00	0.93	2.91	8.79	0.00
SEP-20-2011	T3	6.95	18.00	44443.54	5.45	110.00	42409.48	6.36	130.00	0.90	4.58	16.65	18.18
SEP-26-2011	T4	14.70	180.00	75426.76	22.33	40.00	77223.67	23.72	50.00	0.96	2.38	6.26	25.00
OCT-01-2011	T5	53.36	120.00	393543.34	52.19	80.00	365448.02	60.43	80.00	0.79	7.14	15.78	0.00
OCT-02-2011	T6	36.50	60.00	353880.18	21.64	310.00	309920.60	24.76	290.00	0.80	12.42	14.37	6.45
OCT-09-2011	T7	25.10	138.00	194645.57	19.50	50.00	166336.77	19.14	60.00	0.79	14.54	1.84	20.00
OCT-10-2011	T8	25.20	60.00	190393.49	11.53	80.00	170311.70	13.19	80.00	0.78	10.55	14.34	0.00
OCT-11-2011	T9	28.57	48.00	249835.21	26.10	270.00	217897.60	22.27	260.00	0.81	12.78	14.68	3.70
OCT-20-2011	T10	38.68	150.00	249779.20	45.33	220.00	261015.98	42.49	230.00	0.87	4.50	6.26	4.55
Promedio										0.85	9.18	10.06	8.03
SD										0.07	5.81	5.82	9.38
CV										0.08	0.63	0.58	1.17

Cuadro 10. Estadísticas de eficiencia en calibración de tormentas para la cuenca del río Toyogres, donde V, representa el volumen escurrido; P, el caudal pico; Pt, el tiempo pico; NS, la eficiencia de Nash Sutcliffe; Ev, el error volumétrico relativo; Ep, el error pico relativo y Ept, el error relativo al tiempo pico.

Fecha	Tormenta	Vol. Prec (mm)	Max.Int (mm/hr)	Observado			Modelado			NS	Error relativo		
				V (m3)	P (m3/s)	Pt (min)	V (m3)	P (m3/s)	Pt(min)		Ev (%)	Ep (%)	Ept (%)
SEP-12-2011	T1	20.18	90.00	11056.03	0.87	60.00	10035.27	0.94	50.00	0.82	9.23	7.08	16.67
SEP-18-2011	T2	17.80	30.00	7429.86	1.44	40.00	7015.62	1.41	40.00	0.84	5.58	1.96	0.00
SEP-20-2011	T3	6.95	18.00	1497.90	0.35	50.00	1650.19	0.37	50.00	0.81	10.17	5.03	0.00
SEP-26-2011	T4	14.70	180.00	2505.73	0.77	20.00	2135.77	0.89	20.00	0.73	14.76	15.35	0.00
OCT-01-2011	T5	53.36	120.00	57083.64	8.56	50.00	43179.78	10.63	50.00	0.81	24.36	24.12	0.00
OCT-02-2011	T6	36.50	60.00	13409.11	1.31	290.00	13171.87	1.28	260.00	0.83	1.77	2.05	10.34
OCT-09-2011	T7	25.10	138.00	9107.93	2.24	30.00	6807.36	2.86	30.00	0.77	25.26	27.77	0.00
OCT-10-2011	T8	25.20	60.00	17609.93	1.73	40.00	12918.39	1.93	30.00	0.73	26.64	11.54	25.00
OCT-11-2011	T9	28.57	48.00	18841.31	1.81	250.00	16074.95	1.49	200.00	0.82	14.68	17.60	20.00
OCT-20-2011	T10	38.68	150.00	64729.49	6.89	200.00	60697.71	8.34	200.00	0.80	6.23	21.06	0.00
Promedio										0.80	13.87	13.36	7.20
SD										0.04	8.90	9.28	9.95
CV										0.05	0.64	0.69	1.38

Cuadro 11. Estadísticas de eficiencia en calibración de tormentas para la cuenca de la quebrada Zopilote, donde V, representa el volumen escurrido; P, el caudal pico; Pt, el tiempo pico; NS, la eficiencia de Nash Sutcliffe; Ev, el error volumétrico relativo; Ep, el error pico relativo y Ept, el error relativo al tiempo pico.

En ambas cuencas, las intensidades máximas, las cuales corresponden a tormentas ocurridas a finales de Septiembre y durante Octubre de 2011, alcanzaron valores tan altos como 180 mm/hr (tormenta T4) y tan bajas como 18 mm/hr (tormenta T3) según lo muestra la Figura 27. Los volúmenes máximos precipitados van desde los 53.36 mm (tormenta T5) hasta los 6.95 mm (tormenta T3). En el caso del Toyogres, estas tormentas produjeron caudales pico que van desde los 52.19 m³/s (tormenta T5) hasta los 5.45 m³/s (tormenta T3). En el caso del Zopilote, de mucha menor extensión, se produjeron caudales-pico máximos de 8.56 m³/s y mínimos de 0.35 m³/s para las mismas tormentas. Lo anterior, evidencia una variación de un orden de magnitud; tanto en las intensidades máximas de tormenta como en los caudales pico producidos por las mismas. La Figura 27 muestra que no necesariamente existe una correlación lineal entre los volúmenes precipitados y las máximas intensidades registradas. Así por ejemplo la tormenta T8, con 25.20 mm precipitados, presentó una intensidad máxima de 60 mm/hr. A manera de contraste, la tormenta T7 con un volumen precipitado de 25.10 mm (casi idéntico al de la tormenta T8), presentó una intensidad máxima de 138 mm/hr. La tormenta T4, está dentro de los eventos de mayor intensidad con 180 mm/hr y menor volumen precipitado al mismo tiempo (14.7 mm). Lo anterior, demuestra la alta variabilidad en intensidad, volumen y distribución temporal de los eventos de tormenta que se presentan en el área de estudio.

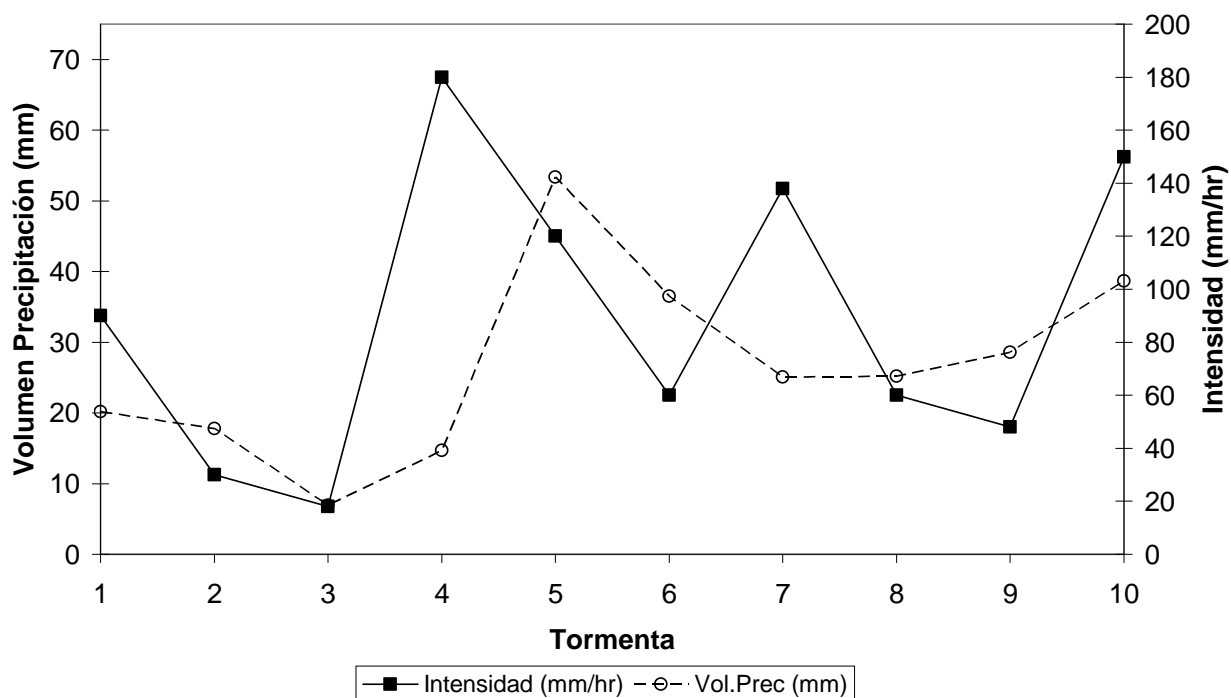


Figura 27. Intensidades máximas y volúmenes de precipitación correspondientes a las tormentas utilizadas en la calibración del modelo SWMM.

Este espectro tan amplio en la naturaleza de los eventos de tormenta, garantiza que en el proceso de calibración de SWMM, se tomaron en cuenta condiciones plenamente extremas. Con esto se logra evaluar la robustez de la metodología de calibración paramétrica con PEST y el grado de adaptabilidad del modelo a tales condiciones.

El Cuadro 10, muestra la eficiencia NS de cada tormenta individualmente calibrada con PEST para la cuenca del río Toyogres. Puede apreciarse una eficiencia promedio NS de 0.85 ± 0.07 , lo cual a su vez, representa un CV del 8%. Rientjes (2010), en su tratado de modelación hidrológica, establece que un NS de entre 0.6 a 0.8 indica un desempeño del modelo razonablemente bueno, muy bueno entre 0.8 a 0.9 y extremadamente bueno por arriba de 0.9. Es este sentido, una eficiencia promedio de 0.85 sugiere un muy buen desempeño general de SWMM y demuestra a su vez que el modelo es capaz de adaptarse a condiciones de iniciación extremas. La Figura 28, trata de establecer alguna correlación entre la eficiencia NS, la intensidad y el volumen de precipitación. Sin embargo, la dispersión en ambas series de datos, no indica ninguna correlación clara entre las variables.

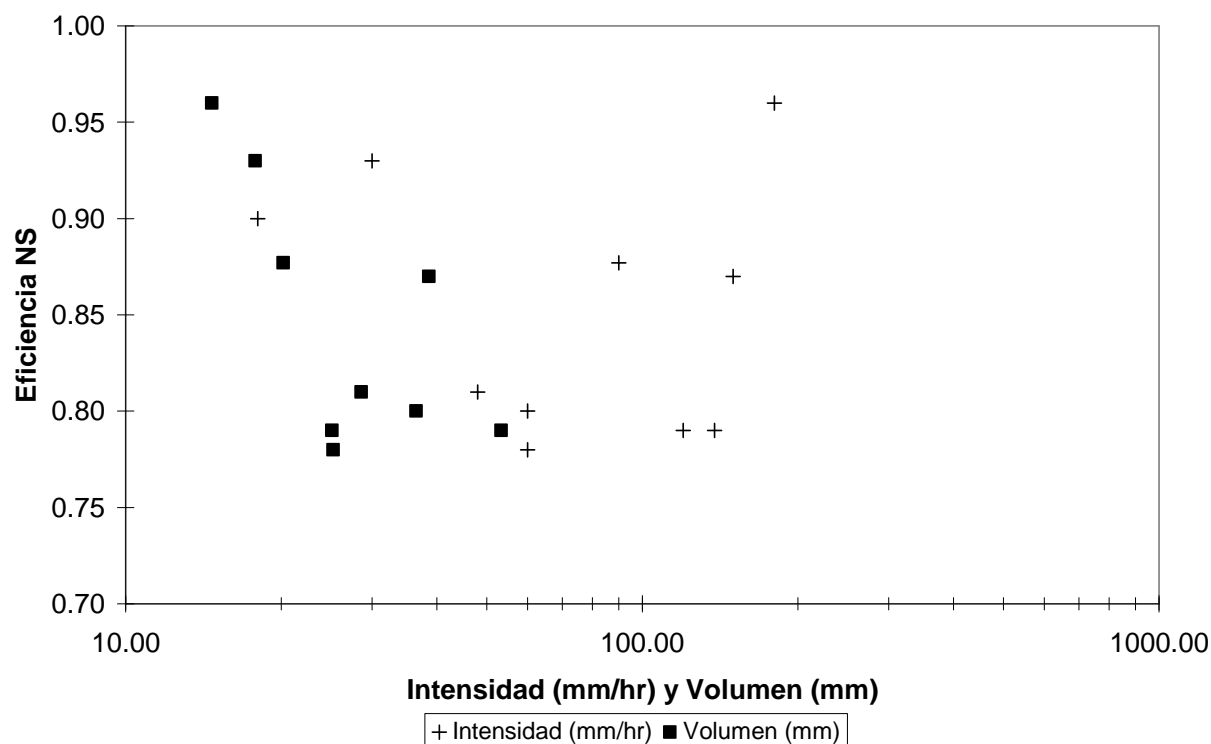


Figura 28. Correlación entre la eficiencia NS, la intensidad y el volumen de precipitación para la cuenca del río Toyogres.

Lo anterior es de esperarse, ya que los patrones de intensidad, distribución espacial y temporal de la precipitación, son altamente variables y la presencia de tres estaciones meteorológicas no garantiza representatividad en la toma de datos para toda el área de la cuenca. La Figura 29, muestra una comparación entre los hidrogramas observados y PEST-calibrados junto con el hietograma correspondiente a la tormenta T9 para la cuenca del río Toyogres. Puede notarse que el patrón de precipitación se extiende principalmente a lo largo de 16 horas, lo cual evidencia una baja intensidad (48 mm/hr, Cuadro 10) contra un volumen precipitado de mediana intensidad (26.1 mm, Cuadro 10). Para este caso, la eficiencia NS es de 0.81, mientras que los Ev, Ep y Ept alcanzan valores de 12.78 %, 14.68 % y 3.70 % respectivamente. Un error volumétrico de 12.78% sugiere un faltante de masa que no está adecuadamente introducido en los

datos de precipitación del SWMM. Al mirar los datos observados de caudal en la Figura 29, entre la hora 0:00 y 3:00 existen dos picos del hidrograma general que evidentemente no están siendo modelados por SWMM. La razón de ellos, parece estar ligada al hecho de que ninguna de las tres estaciones meteorológicas distribuidas en el área de la cuenca, fue capaz de registrar los eventos de precipitación que produjeron tales picos. En otras, hubo precipitación localizada sobre alguna sección de la cuenca que no estuvo dentro del área de influencia de ninguna de las estaciones. Este faltante de masa, se traduce en una evidente subestimación del caudal pico, por lo que Ep llega a su valor de 14.68%. Esto evidentemente afecta de la misma manera al índice NS, ya que valores considerables de caudal observado están siendo comparados contra valores modelados de caudal virtualmente iguales a cero.

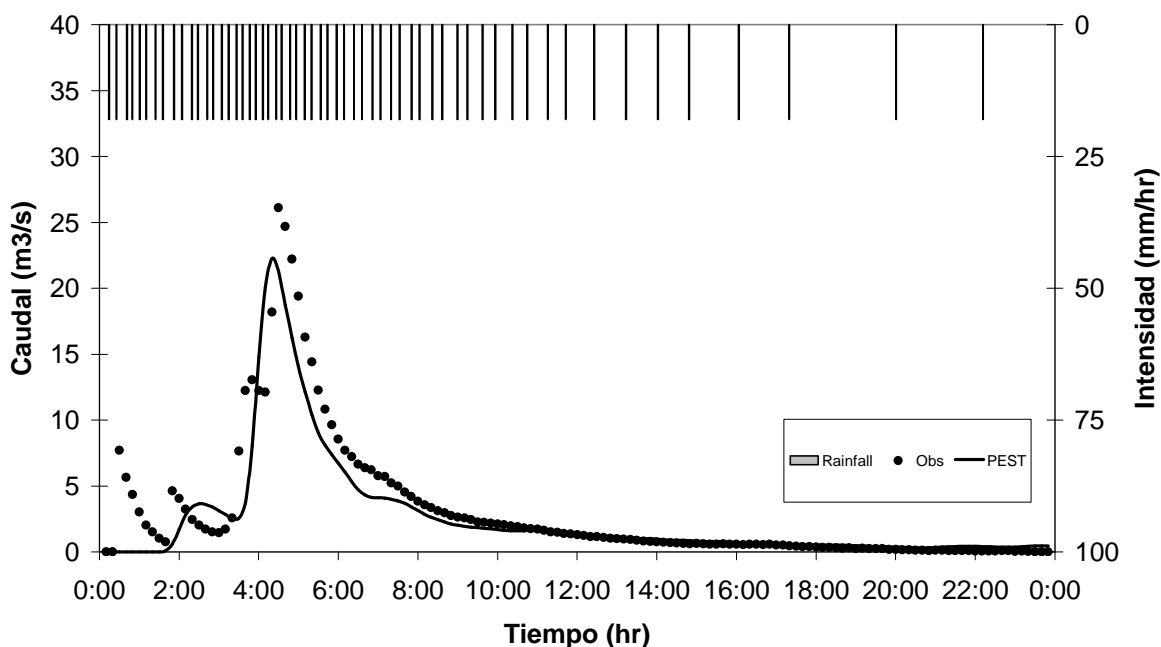


Figura 29. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados junto con el hietograma correspondiente a la tormenta T9 para la cuenca del río Toyogres.

Un caso contrastante, resulta ser el de la tormenta T10, con una intensidad máxima de 150 mm/hr y un volumen precipitado de 38.7 mm (Cuadro 10) y expuesto por la Figura 30. Como puede verse, los dos picos más importantes del hidrograma observado corresponden justamente a los dos picos de intensidad que experimentó la tormenta T10. En relación a la T9, la T10 es una tormenta mucho más intensa, más puntual y menos distribuida en el tiempo que produce curvas de ascenso y descenso muy diferentes a aquellas mostradas por la tormenta T9 y con caudales pico igualmente muy diferentes; 26.10 m³/s contra 45.33 m³/s respectivamente. Ambos hidrogramas dejan claro la reactividad tan elevada que exhibe la cuenca del Toyogres con tiempos de concentración que no superan los 30 minutos. Dicho de otra forma, los caudales picos se generan en un espacio temporal peligrosamente corto, de alrededor de 30 minutos. Es evidente también que la elevada congruencia que existe entre datos observados y modelados se debe a la alta resolución temporal de los datos. Datos agregados a 5, 10,

30 o más minutos, tendría efectos devastadores en la respuesta de SWMM y cualquier otro modelo que se pretendiese utilizar en condiciones de alta pendiente y alta intensidad de tormentas. Por otro lado, es interesante notar, como SWMM tiende a subestimar el primer pico del hidrograma y como por otro lado, tiende a sobre estimar el segundo pico. La calibración con la tormenta T10, exhibe una eficiencia NS del 0.87 junto con errores volumétricos, pico y tiempo pico menores a aquellos encontrados para la tormenta T9; 4.50%, 6.26% y 4.55% respectivamente.

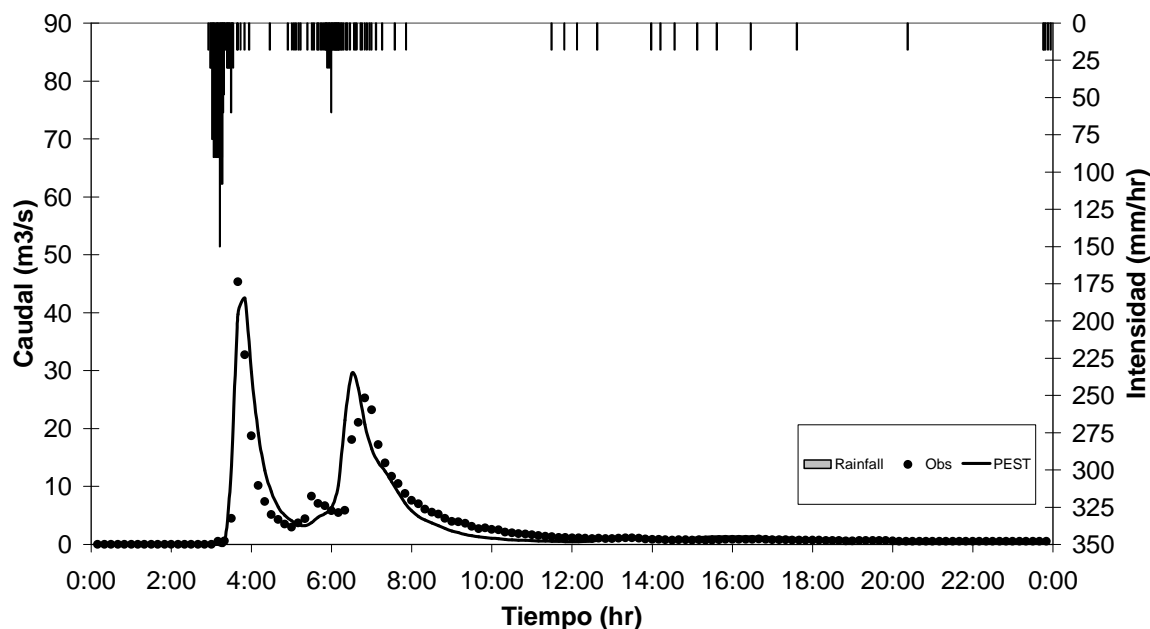


Figura 30. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados junto con el hietograma correspondiente a la tormenta T10 para la cuenca del río Toyogres.

El Cuadro 10, muestra en resumen un E_v promedio de $9.18\% \pm 5.81$, un E_p promedio de $10.06\% \pm 5.82$ y un E_{pt} promedio de $8.03\% \pm 9.38$, con CV de 0.63, 0.58 y 1.17 correspondientemente. Queda claro que la dispersión alrededor de todos los errores relativos es muy alta, lo cual ratifica nuevamente las condiciones particulares de cada tormenta. Otro aspecto importante a considerar es el hecho de que los parámetros de SWMM ligados al flujo base no fueron tomados en cuenta en el proceso de calibración. Aun cuando a los datos observados se les ha extraído el flujo base; de acuerdo a la metodología propuesta por el USGS (Lee & Risley 2002), no puede eliminar totalmente la influencia del mismo en la información que cada hidrograma acarrea internamente. Independientemente de la eficiencia o de los errores relativo, la tendencia modelada por SWMM es capaz de adaptarse satisfactoriamente a la geometría de todos los hidrogramas observados.

Barco *et al.* (2008), en su estudio de calibración de la cuenca del río Ballona en California con SWMM; obtuvo un E_v promedio de $8.9\% \pm 7.0$ y un E_p de $10.0\% \pm 8.0$ para un área mucho más grande (217 Km^2) y mucho más urbana (ciudad de Los Ángeles) que aquella contemplada en este estudio. Muy similar a nuestro caso, Barco *et al.* (2008) calibró diez tormentas independientes en su versión modificada de SWMM

utilizando el método Caja Compleja (Complex Box en inglés) pero con intensidades muy bajas en comparación a nuestras condiciones (menores a 15 mm/hr). En un intento de re-calibrar cada tormenta con el promedio de los parámetros calibrados individualmente para cada tormenta, la eficiencia de su modelo se vio considerablemente deteriorada con un aumento del Ev promedio a $29.09\% \pm 27.0$ y un aumento del Ep a $26.0\% \pm 14.0$. Los trabajos presentados por Maneta *et al.* (2007), Dongquan *et al.* (2009), Temprano *et al.* (2006) y Smith *et al.* (2005), coinciden en que cada tormenta presenta características únicas y cada una tiene el potencial de hacer reaccionar el modelo de maneras muy diferentes. Es por lo tanto de esperar, que durante el proceso de validación del modelo, utilizando el promedio simple de los parámetros calibrados por tormenta de forma individual, la eficiencia de las funciones objetivo tiendan a disminuir.

El Cuadro 11, muestra las estadísticas de calibración en el caso de la quebrada Zopilote. La eficiencia general de SWMM sobre esta cuenca es menor que aquella obtenida para la cuenca del Toyogres, con una eficiencia NS promedio de $0.8\% \pm 0.4$ y un Ev promedio de $13.87\% \pm 8.90$, un Ep promedio de $13.36\% \pm 9.28$ y un Ept promedio de $7.20\% \pm 9.95$, con CV de 0.64, 0.69 y 1.38 correspondientemente.

Las razones alrededor de esta menor eficiencia, están directamente ligadas al hecho de que la quebrada Zopilote presenta mucho más infraestructura en relación al cauce del Toyogres. Mucha de esta infraestructura, incluye puentes muy angostos, secciones completas del cauce entubadas e incluso lagunas de retención. Estos factores, aunados al hecho de que los levantamientos topográficos otorgados por la municipalidad de Cartago podrían no adaptarse adecuadamente al nivel vertical del DEM utilizado durante el hidropcesamiento; dan al traste con una menor eficiencia y mayores errores relativos. Otro aspecto igualmente relevante, es el hecho de que si los pozos de registro en las secciones presurizadas del sistema de alcantarillado se inundan y derraman, este caudal másico sale del sistema y no puede ser incluido nuevamente en el balance de general masas.

La Figura 31 (Cuadro 11), correspondiente a la tormenta T6 en la quebrada Zopilote, muestra como el primer pico del hidrograma es considerablemente sobreestimado por parte de SWMM aun cuando la sincronía temporal es evidentemente admisible. Según SWMM, para las 00:40, debió existir mucho más caudal del que realmente llegó a concentrarse. Lo anterior respalda la hipótesis de que existe retención de flujo por almacenamiento. A manera de contraste, el segundo pico del hidrograma es ligeramente subestimado por SWMM pero sí llega a darse un desfase en el tiempo pico de aproximadamente 20 minutos. Existe también la posibilidad de que exista infraestructura ajena a la caracterización original que pudiera estar aportando flujos externos; correspondientes a otro sector del casco urbano de Cartago. Este pensamiento pareciera encontrar fundamento en el comportamiento de la Tormenta T7 (Figura 32; Cuadro 11). Nótese que todos los picos producidos por SWMM, sobreestiman los observados en el hidrograma; además, el tercer pico (12:40) tan siquiera se ve reflejado en los datos de precipitación. Al ser el área del Zopilote muy pequeña, la teoría de aportes externos toma mucha más fuerza. Una caracterización más minuciosa de la red de drenaje podría demostrar dicho punto.

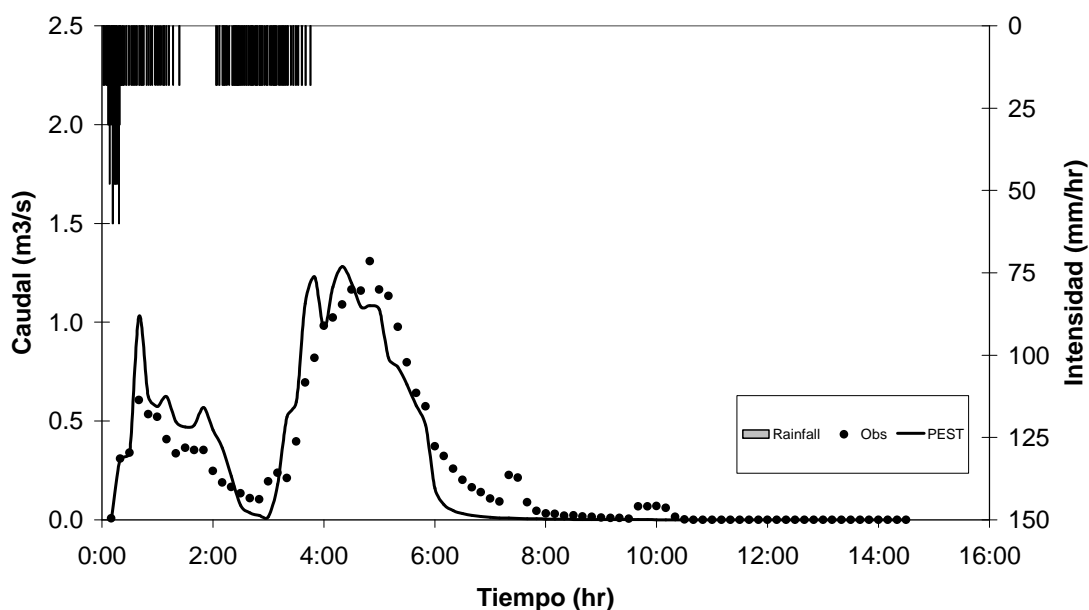


Figura 31. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados junto con el hietograma correspondiente a la tormenta T6 para la cuenca de la quebrada Zopilote.

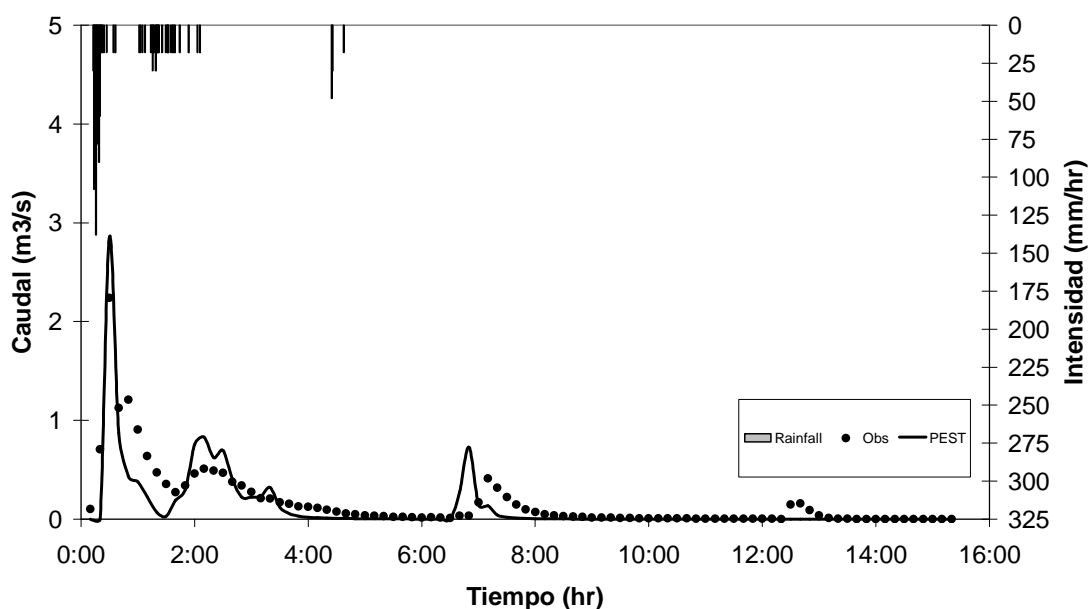


Figura 32. Comparación entre los hidrogramas observados y calibrados junto con el hietograma correspondiente a la tormenta T7 para la cuenca de la quebrada Zopilote.

El anterior análisis demuestra la a robustez de la metodología de calibración paramétrica con PEST y evidencia el alto grado de adaptabilidad del modelo SWMM a condiciones de precipitación extremas y cambiantes.

Los Cuadros 12 y 13, muestran las estadísticas de eficiencia en validación para las cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote; correspondientes a tres tormentas individuales ocurridas entre Octubre y Noviembre de 2011. Debe recordarse que estos

eventos son independientes y no fueron utilizados durante el proceso de calibración. En general, las eficiencias y errores relativos promedio en ambas cuencas se mantienen muy similares a aquellos obtenidos durante la calibración. En el caso del Toyogres, la eficiencia NS promedio llega a 0.87, muy similar a la encontrada en calibración con un valor de 0.85. Lo mismo aplica para el Zopilote, con un NS en validación de 0.77 contra 0.80 en validación.

A pesar de que solo se pudieron utilizar tres eventos de tormenta en validación, estos eventos están claramente distanciados entre sí en el tiempo y aportan volúmenes importantes de precipitación a la cuenca. Lo anterior, sugiere que utilizar el promedio simple de los parámetros calibrados por tormenta de forma individual (10 en total para cada cuenca), afecta levemente el desempeño de respuesta del modelo SWMM. En este sentido, es indispensable analizar la sensibilidad relativa de los parámetros involucrados con el fin de establecer jerarquías y posibles correlaciones entre los mismos.

Fecha	Tormenta	Vol. Prec (mm)	Max.Int (mm/hr)	Observado			Modelado			NS	Error relativo		
				V (m3)	P (m3/s)	Pt (min)	V (m3)	P (m3/s)	Pt(min)		Ev (%)	Ep (%)	Ept (%)
OCT-21-2011	V1	18.40	30.00	142821.75	12.85	250.00	133037.92	13.45	250.00	0.88	6.85	4.64	0.00
OCT-31-2011	V2	44.60	90.00	273156.12	26.05	250.00	255525.24	29.35	250.00	0.90	6.45	12.67	0.00
NOV-25-2011	V3	22.82	30.00	190396.03	15.64	170.00	160087.07	14.95	180.00	0.82	15.92	4.40	5.88
Promedio										0.87	9.74	7.24	1.96
SD										0.04	5.35	4.71	3.40
CV										0.05	0.55	0.65	1.73

Cuadro 12. Estadísticas de eficiencia en validación de tormentas para la cuenca del río Toyogres, donde V, representa el volumen escurrido; P, el caudal pico; Pt, el tiempo pico; NS, la eficiencia de Nash Sutcliffe; Ev, el error volumétrico relativo; Ep, el error pico relativo y Ept, el error relativo al tiempo pico.

Fecha	Tormenta	Vol. Prec (mm)	Max.Int (mm/hr)	Observado			Modelado			NS	Error relativo		
				V (m3)	P (m3/s)	Pt (min)	V (m3)	P (m3/s)	Pt(min)		Ev (%)	Ep (%)	Ept (%)
OCT-21-2011	V1	18.40	30.00	10213.14	1.52	210.00	10026.01	1.40	200.00	0.78	1.83	7.98	4.76
OCT-31-2011	V2	44.60	90.00	47242.71	5.62	210.00	31063.61	6.27	170.00	0.76	34.25	11.53	19.05
NOV-25-2011	V3	22.82	30.00	9869.46	1.72	140.00	9916.50	2.06	150.00	0.76	4.80	19.31	7.14
Promedio										0.77	13.63	12.94	10.32
SD										0.01	17.92	5.79	7.65
CV										0.02	1.32	0.45	0.74

Cuadro 13. Estadísticas de eficiencia en validación de tormentas para la cuenca de la quebrada Zopilote, donde V, representa el volumen escurrido; P, el caudal pico; Pt, el tiempo pico; NS, la eficiencia de Nash Sutcliffe; Ev, el error volumétrico relativo; Ep, el error pico relativo y Ept, el error relativo al tiempo pico.

Un aspecto que igualmente preocupa es el efecto que la resolución temporal de los datos de precipitación pudiera tener sobre la respuesta del modelo SWMM ante un eventual caso de agregación de la información. La Figura 33, muestra el hidrograma calibrado, expresado en nivel para la cuenca del Toyogres correspondiente a la tormenta T2 y con la resolución estándar de 1 minuto. Con el propósito de evaluar el impacto de la resolución temporal, los datos fueron agregados a 10 y 30 minutos respectivamente. Puede verse claramente que la tendencia es a sobreestimar el primer pico mientras el segundo pico va quedando cada vez más marginado; hasta el punto

que con la resolución de 30 minutos, prácticamente toda la masa se traslada al primer pico. Lo anterior es preocupante, dada la altísima variabilidad temporal de las tormentas en el área de estudio. Lo anterior hace suponer que en condiciones similares, serían necesarios datos de precipitación igualmente densos para una adecuada modelación del comportamiento de cualquier cuenca, dejando poca o nula cabida a la utilización de datos sintéticos de precipitación. Lo anterior ha sido discutido ampliamente por Aronica *et al.* (2005) en su estudio sobre el impacto de la resolución temporal de la precipitación sobre SWMM. En su estudio comparativo, aplicado sobre la cuenca Parco d'Orleans en Palermo, Italia, Aronica *et al.* (2005) encontró que para una mejor descripción de los caudales picos y los volúmenes escurridos, SWMM requiere de un Δt lo más representativo a la variabilidad local que se está analizando.

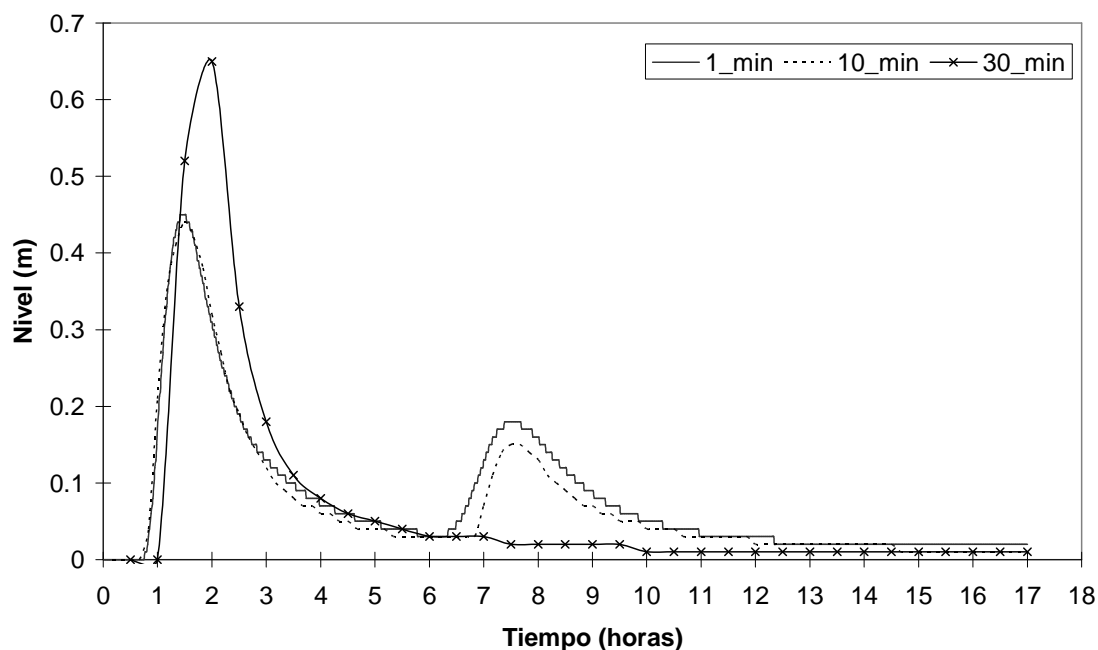


Figura 33. Variabilidad de los hidrogramas de tormenta para diferentes resoluciones temporales en relación a la tormenta T2 para la cuenca del río Toyogres.

Variabilidad de los parámetros

Las Figuras 34 y 35, muestran la evolución temporal de los parámetros calibrados por tormenta para las cuencas de río Toyogres y la quebrada Zopilote. La característica más obvia en ambas figuras, es el patrón de desplazamiento en los valores de ciertos parámetros, particularmente **nper**, **nimp** y **ncha**, que presentan algunos de los parámetros agregados del modelo SWMM (Cuadro 5). Sus altas desviaciones (SD) y coeficientes de variación (CV) mostrados secuencialmente por los Cuadro 14 y 15, subrayan la cambiante naturaleza de tales parámetros. Esto, pudiera ser el reflejo de las igualmente cambiantes condiciones que imperan en ambas cuencas y del alto grado de adaptación que presenta SWMM, principalmente en la cuenca del río Toyogres.

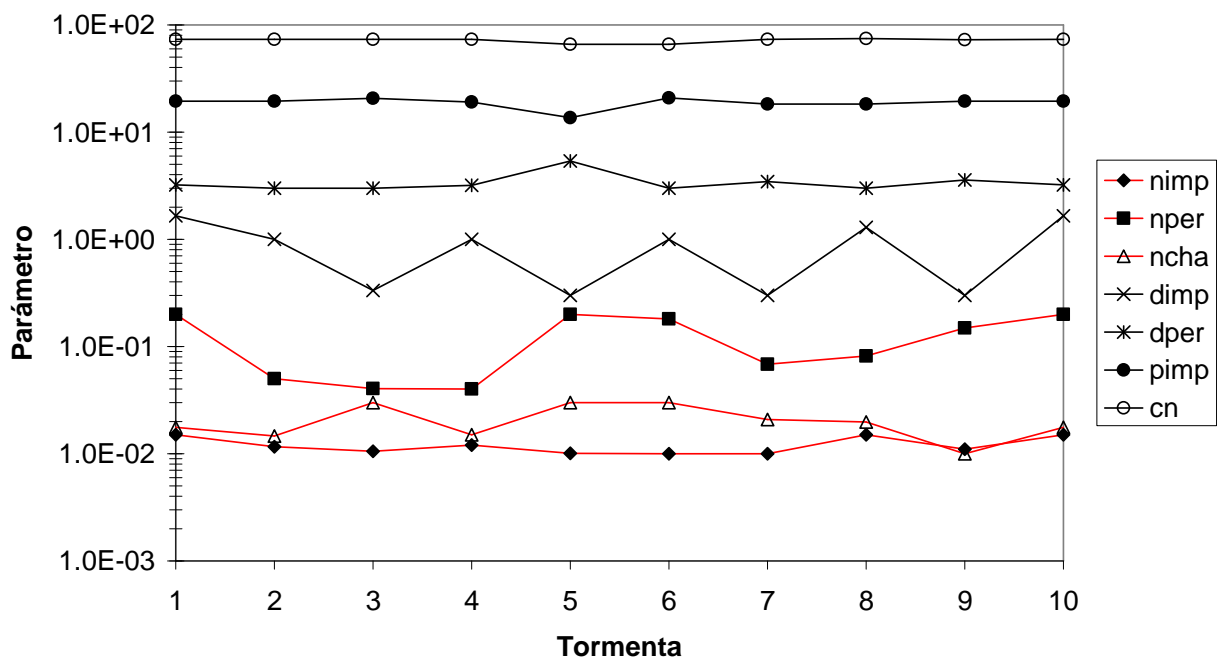


Figura 34. Variabilidad de parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

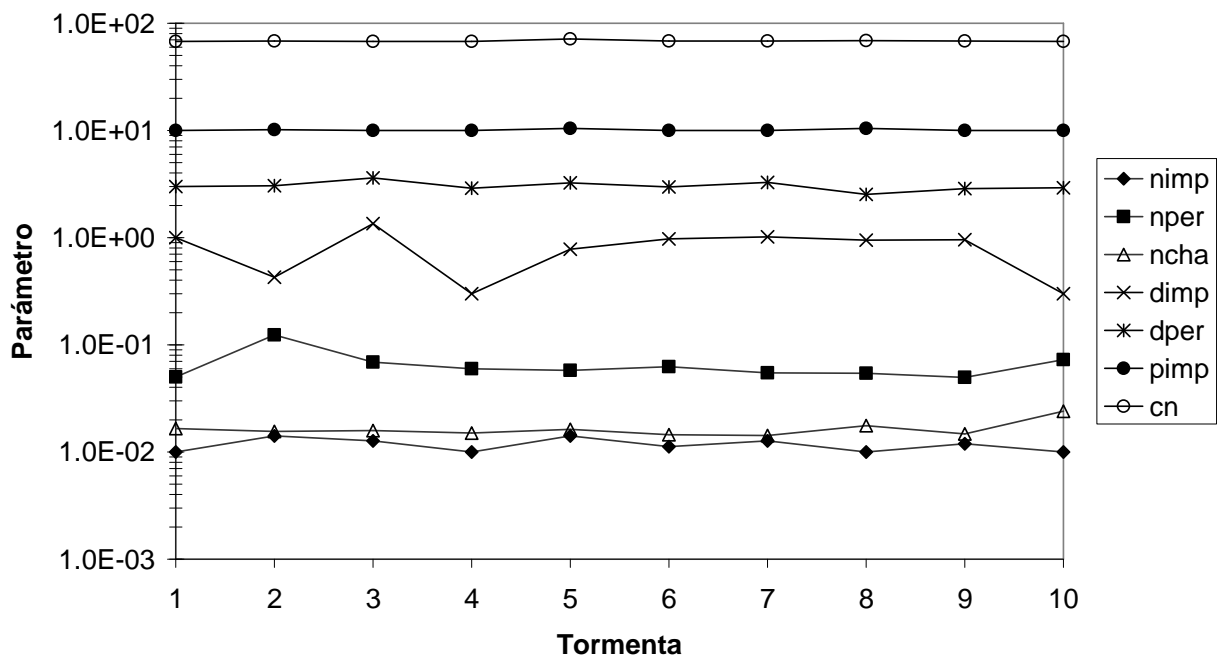


Figura 35. Variabilidad de parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Parametro	Tormenta										Promedio	SD	CV
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10			
nimp	0.0150	0.0117	0.0105	0.0120	0.0101	0.0100	0.0100	0.0150	0.0110	0.0150	0.0120	0.002	17.914
nper	0.2000	0.0499	0.0406	0.0400	0.2000	0.1811	0.0682	0.0817	0.1490	0.2000	0.1211	0.071	58.751
dimp	1.6601	1.0000	0.3349	1.0000	0.3000	1.0000	0.3000	1.2942	0.3000	1.6601	0.8849	0.552	62.329
dper	3.2309	3.0000	3.0000	3.1863	5.3584	3.0000	3.4585	2.9914	3.5657	3.2309	3.4022	0.716	21.050
ncha	0.0176	0.0146	0.0300	0.0150	0.0300	0.0300	0.0209	0.0197	0.0100	0.0176	0.0206	0.007	34.871
pimpsbt1	19.4000	19.4297	20.7085	19.1682	13.5800	20.7877	18.2275	18.2866	19.4269	19.4000	18.8415	2.029	10.770
cnsbt1	73.2000	73.0991	73.2000	73.1947	65.8800	65.8800	73.6366	74.7973	72.5656	73.2000	71.8653	3.206	4.461

Cuadro 14. Variabilidad de parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

Parametro	Tormenta										Promedio	SD	CV
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10			
nimp	0.0100	0.0141	0.0127	0.0100	0.0141	0.0112	0.0127	0.0100	0.0119	0.0100	0.0117	0.002	14.334
nper	0.0500	0.1232	0.0687	0.0600	0.0577	0.0626	0.0548	0.0544	0.0498	0.0726	0.0654	0.022	33.079
dimp	1.0000	0.4259	1.3520	0.3000	0.7823	0.9751	1.0163	0.9500	0.9559	0.3000	0.8057	0.351	43.565
dper	3.0000	3.0586	3.6011	2.9000	3.2532	2.9685	3.2736	2.5283	2.8612	2.9081	3.0353	0.289	9.527
ncha	0.0165	0.0156	0.0158	0.0150	0.0163	0.0145	0.0143	0.0177	0.0148	0.0240	0.0165	0.003	17.291
pimpsbt1	10.0000	10.2152	10.0000	10.0000	10.4206	10.0111	10.0122	10.4421	10.0000	10.0000	10.1101	0.182	1.799
cnsbt1	68.0000	68.0328	68.0000	68.0000	71.1934	68.0669	68.0643	68.7813	68.0607	68.0000	68.4199	1.003	1.466

Cuadro 15. Variabilidad de parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Lo anterior es de esperar, ya que en el método de calibración utilizado, donde cada tormenta se calibra de forma individual en virtud de observaciones de caudal equivalentemente individuales, la optimización de los parámetros de SWMM por parte de PEST, se adapta a aspectos únicos de cada tormenta, lo cual incluye volumen e intensidad. No solo la naturaleza cambiante de las tormentas, juega un papel determinante en la variabilidad de los parámetros. Se deben de tomar en cuenta factores estacionales ligados a la cobertura y el uso de suelo, sobre todo aspectos ligados al crecimiento de la vegetación y cultivos, principalmente en la zonas altas de la cuenca del Toyogres.

La variabilidad de las propiedades físicas del suelo, en virtud de su condición de humedad antecedente es igualmente determinante. Este comportamiento es respaldado por los resultados obtenidos por Guo (1998) en su estudio analítico de la escorrentía superficial sobre superficies permeables haciendo uso del modelo de onda cinemático. Este autor reveló que las curvas de ascenso y descenso de los hidrogramas se ven profundamente afectadas por las condiciones de humedad antecedente del suelo y su relación con los parámetros del modelo de onda cinemática. La importancia relativa de todos los factores relacionados a los procesos de escorrentía, es dinámica y cambiante y podría a la larga, desencadenar en un proceso de compensación de errores; razón por la cual, estos parámetros se consideraron como agregados desde un inicio siguiendo las recomendaciones de Duan *et al.* (1992) y Fang & Ball (2007).

Como consecuencia, la estructura de SWMM tiende a adaptarse a las diferentes relaciones y cocientes entre las entradas y salidas del sistema, sobre todo desde el punto de vista de tránsito hidráulico. En diversos modelos hidrológicos, muchos de los parámetros ligados al tránsito hidráulico, principalmente aquellos relacionados a la rugosidad de las superficies, se consideran como parámetros eminentemente físicos y

constantes. Los trabajos realizados por Abrahams *et al.* (1994); Weltz *et al.* (1992); Wu *et al.* (1999) y aquellos encontrados experimentalmente por Méndez & Araya (2008), han demostrado que estos parámetros cambian en virtud de las características de flujo; lo cual a su vez se traduce en un cambio de las rugosidades y los tirantes hidráulicos efectivos. Se ha encontrado igualmente, una disminución de la resistencia al flujo; una vez que la vegetación o las láminas de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable y permeable quedan sumergidas.

Esta relación inversa, concuerda con el hecho de que intensidades de precipitación altas producen tiempos picos efectivos más cortos. La Figura 36 demuestra éste comportamiento para la cuenca del río Toyogres, lo cual claramente evidencia un ajuste de los parámetros ligados a la rugosidad en la estructura interna de SWMM, específicamente **nper**, **nimp** y **ncha**.

Estos tres parámetros presentan una variabilidad cercana al orden de magnitud en la cuenca del Toyogres (Figura 34) pero sin embargo, se mantienen considerablemente estables en el caso del Zopilote (Figura 35). No obstante, al analizar las estadísticas de calibración de cada una de las cuencas (Cuadros 10 y 11), la del Toyogres presenta paradójicamente una mayor eficiencia promedio.

Por lo tanto, una mayor estabilidad en la evolución temporal de los parámetros, no debería sugerir una mayor eficiencia del modelo. Por lo contrario, la mayor variabilidad en el caso del Toyogres evidencia una mayor adaptabilidad del modelo SWMM a los aspectos y factores anteriormente discutidos. El motivo de tal comportamiento, parece estar nuevamente ligado a la sensibilidad que presentan los parámetros de rugosidad en virtud del tipo de cobertura, uso del suelo y condición de humedad antecedente del suelo. En este sentido, se debe recordar que la parte alta de la cuenca del Toyogres es eminentemente agrícola, con coberturas vegetales muy diversas y profundos perfiles de suelo (Cuadro 7); mientras que la cuenca del Zopilote, es de carácter meramente urbana, con coberturas vegetales esencialmente ligadas a pastos o charrales menos susceptibles a condiciones de drenaje (Cuadro 8). Una menor variabilidad de los parámetros en el caso del Zopilote versus su menor eficiencia promedio, solo pueden sugerir que los márgenes de variación de los parámetros; los cuales concuerdan con los del Toyogres, no son suficientes para garantizar una mayor eficiencia del modelo en esta cuenca. Dicho de otra forma, la estructura interna de SWMM tendería a ser menos eficiente en la descripción de los procesos de escorrentía y tránsito hidráulico en comparación a la cuenca del Toyogres.

Debido a ello, PEST estaría encontrando áreas considerablemente más planas y más regulares en el espacio paramétrico de SWMM para la cuenca del Zopilote. Como se mencionó con anterioridad, la caracterización de la cuenca del Zopilote y el subsecuente ensamblaje de su modelo en SWMM podrían estar dejando por fuera información importante acerca de las particularidades de la misma y su interacción con factores antropogénicos. Debe recordarse igualmente, que las observaciones de caudal y datos de entrada no están libres de incertidumbre y que aspectos de distribución espacial y temporal contribuyen a la incertidumbre de los parámetros calibrados en virtud de la insuficiencia propia del modelo.

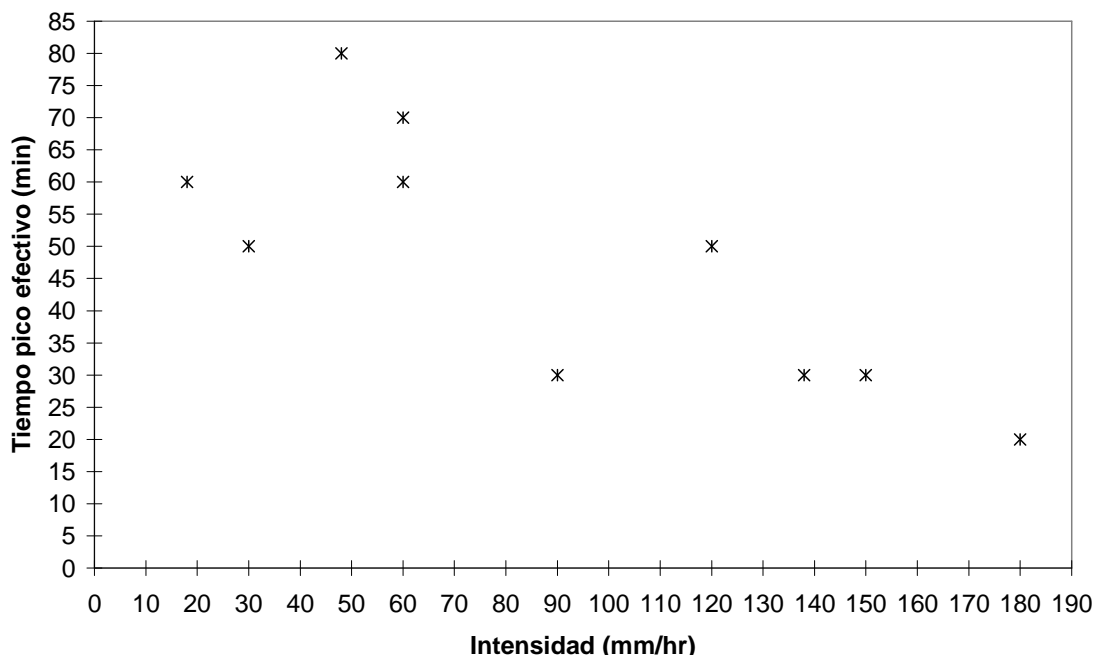


Figura 36. Variabilidad del tiempo pico efectivo versus intensidad de precipitación para la cuenca del río Toyogres.

Otro parámetro que también presenta una variabilidad importante y que puede ser también ligado a las características de superficie, es la lámina de almacenamiento en depresión sobre el área impermeable o **dimp**. Este parámetro agregado, representa una medida indirecta del estancamiento en superficie así como del perímetro mojado. Queda claro que la variación de **dimp** es mayor en la cuenca del Toyogres que en la del Zopilote, pero con valores medios muy cercanos entre sí; 0.89 mm y 0.81 mm respectivamente (Cuadros 14 y 15). Con valores medios por debajo de 1 mm, este parámetro, junto con **dper**, parecieran ser insignificantes en comparación a los volúmenes de precipitación (Cuadros 10 y 11) y por lo tanto, podrían ser fijados al inicio del proceso de optimización y/o análisis. Helming *et al.* (1993), encontró que estos parámetros en efecto tienden a ser insignificantes cuando las láminas de almacenamiento se ubican por debajo de 0.6 mm. Aunque ninguno de los factores anteriormente considerados, puede explicar completamente el comportamiento de los parámetros, sí sugieren una variación significativa del set óptimo de parámetros calibrados y alertan sobre la variabilidad de los resultados de este tipo de modelos cuando tormentas de diversas intensidades son aplicadas.

Análisis de sensibilidad y correlaciones

Estrictamente hablando, la calibración y subsecuente identificación de un parámetro; es importante únicamente si el parámetro resulta crítico en la descripción de los procesos que pretende modelar. Si por lo contrario, el parámetro tiene poco efecto, su calibración puede ser despreciada, lo cual ayuda a la reducción del espacio paramétrico, maximiza los recursos computacionales y minimiza la compensación de errores (Maneta *et al.*

2007). Consecuentemente, la mayor atención en el proceso de calibración debería orientarse hacia los parámetros sensitivos del modelo. De la misma forma, debería procurarse una menor incertidumbre en éste tipo de parámetros.

Tal como lo establece el Cuadro 5, en la construcción de los modelos para las cuencas del Toyogres y el Zopilote, se consideraron tanto parámetros distribuidos como agregados. Debe recordarse que los parámetros agregados (**pimp**, **cn**, y **widt**) representaron 165 parámetros ajustables, mientras que los restantes 5 grupos de parámetros representaron un parámetro cada uno, para un total de 170 parámetros ajustables. Una primera corrida en SWMM para la cuenca del Toyogres, utilizando los datos de la tormenta **T2**, fue ejecutada con los 170 parámetros declarados como parámetros ajustables. Como era de esperarse, la calibración con PEST tomó alrededor de 5 horas en completarse y la ganancia sobre la función objetivo PHI fue insignificante.

La Figura 37, muestra una comparación entre los valores de los parámetros originalmente estimados mediante los datos espaciales y GIS y aquellos obtenidos luego de la calibración distribuida con PEST. En el caso de **widt**, el ancho característico del plano del modelo cinemático, este resultó completamente insensible dado que no hubo variación alguna en su proporcionalidad en el cuarto orden de magnitud. La explicación a ello se centra en las ecuaciones (3), (4) y (5). Con pendientes promedio de 24.3% para la cuenca del Toyogres y 16.9% para el Zopilote; el estado de flujo en todos los tramos de cauce y en cada sección de tubería son eminentemente supercríticos, a partir de este momento, **widt** pierde protagonismo como parámetro, al alcanzarse valores de tiempo de tránsito en superficie menores a 5 minutos. Por lo anteriormente expuesto, **widt** fue excluido del proceso de optimización paramétrica con PEST y sus valores fueron fijados.

Los grupos de parámetros ligados a **pimp** y **SCS-CN** presentaron entre sí muy poca variabilidad respecto a sus estimaciones iniciales con GIS. Consecuentemente, solo al individuo más sensible de cada uno de estos grupos parámetros; fue incluido en el proceso de optimización. Todos los otros parámetros individuales de su correspondiente grupo fueron “**atados**” a este parámetro “**maestro**” de manera que experimentarían un cambio proporcional en virtud de éste parámetro “**maestro**”. En virtud de lo señalado, las Figuras 37 y 38, muestran la evolución temporal de la sensibilidad relativa de los parámetros calibrados para las cuencas del Toyogres y Zopilote. Lo más llamativo en ambas figuras es la disparidad de órdenes de magnitud entre grupos de parámetros (Cuadros 16 y 17). En ambos casos, los parámetros ligados a rugosidades de superficie, **nimp**, **ncha** y **nper** resultan los más sensitivos, aunque en distinto orden. En el caso del Toyogres, **nimp** es levemente más sensible que **ncha**, más la importancia de ambos está un orden de magnitud por encima de **nper**. Este comportamiento resulta muy similar en el caso del Zopilote, aunque la sensibilidad relativa de **nimp** es ligeramente superior a **ncha**. Estos tres grupos de parámetros más sensitivos, resultan mucho más estables en el caso del Toyogres que el caso del Zopilote. Lo anterior sugiere una vez más, el hecho de que PEST mueve a SWMM hasta las bandas superiores en inferiores de sus parámetros ajustables en el caso del Zopilote; en un intento de encontrar el set óptimo de parámetros que mejor armonice las observaciones y modelaciones.

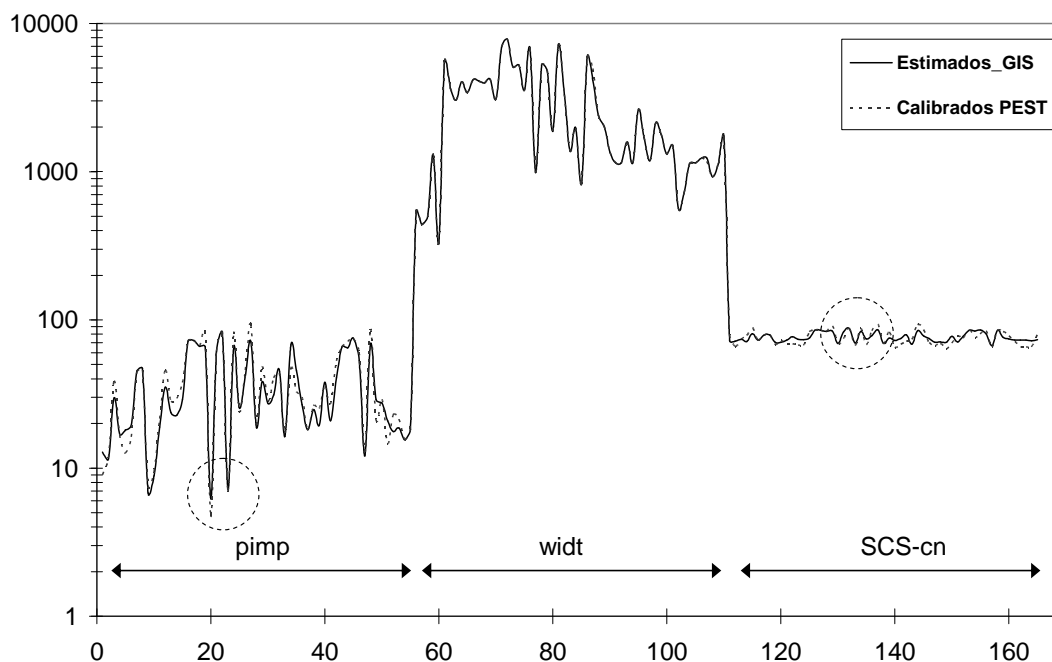


Figura 37. Comparación entre los grupos de parámetros distribuidos estimados mediante GIS y aquellos calibrados por PEST correspondientes a la tormenta T2 sobre la cuenca del río Toyogres.

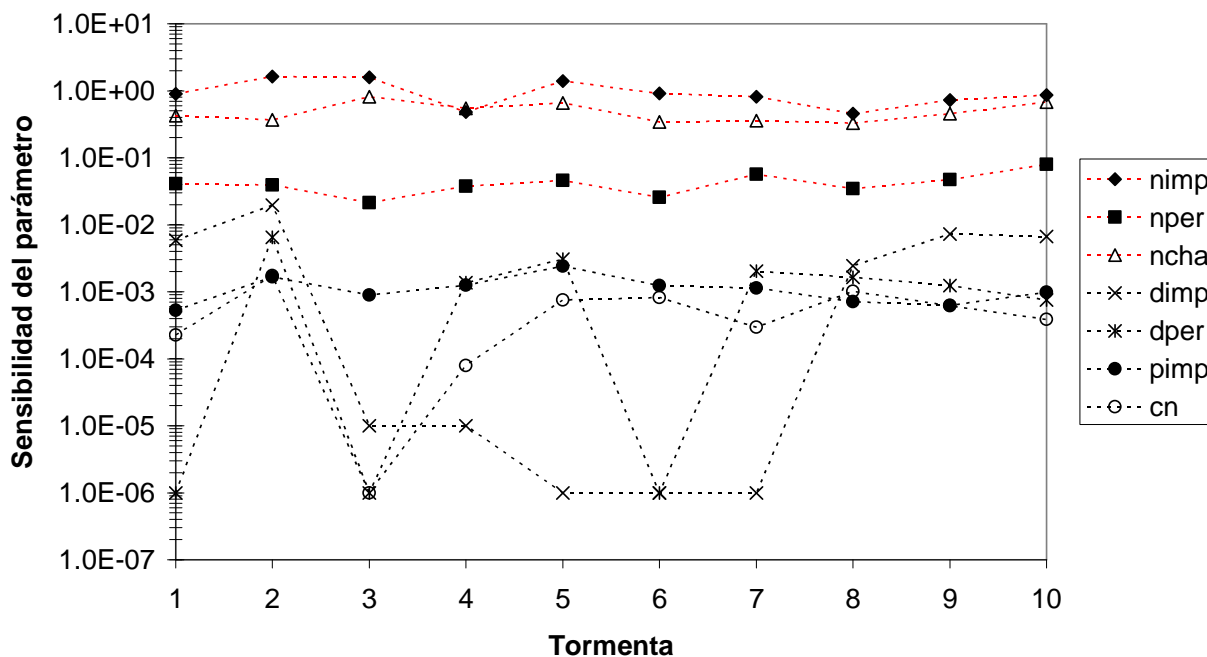


Figura 38. Variabilidad de la sensibilidad de los parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

Por lo contrario, una mayor estabilidad de la sensibilidad de los parámetros en el caso del Toyogres, sugieren una mejor descripción de los procesos físicos que ocurren en esa cuenca por parte de SWMM en virtud del control ejercido por PEST.

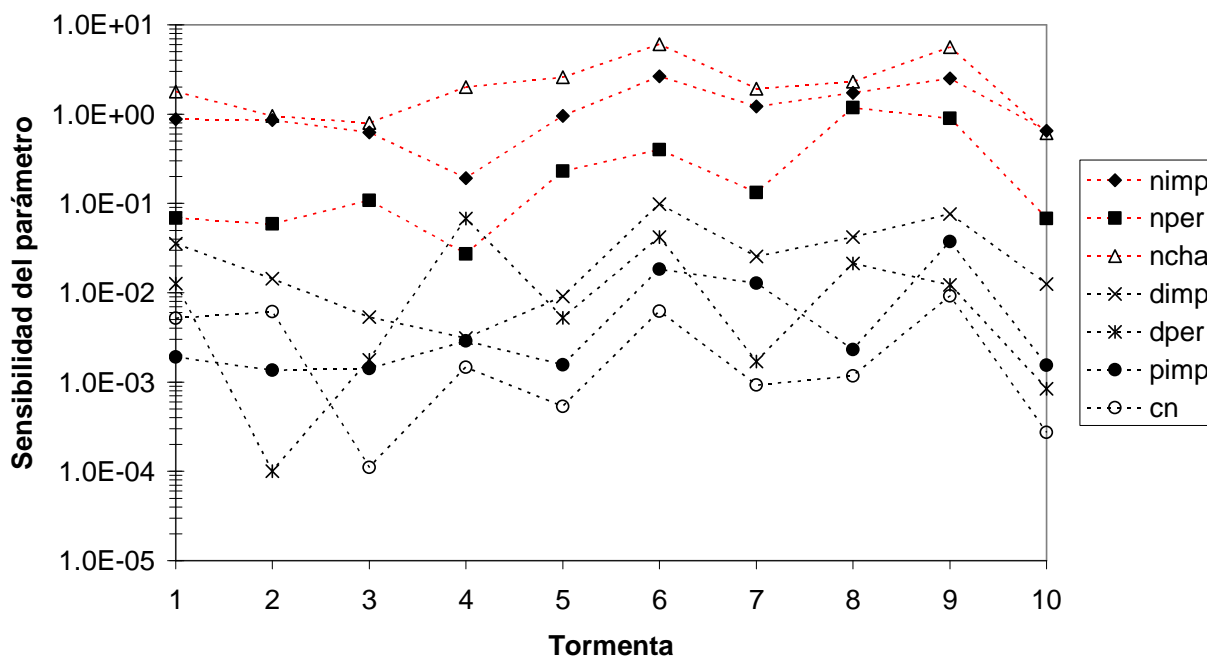


Figura 39. Variabilidad de la sensibilidad de los parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

En el caso del Toyogres, **dimp** y **dper** son mayoritariamente sensibles para las tormentas T1, T2, T9 y T10. Estas tormentas comparten la particularidad de anteceder o preceder periodos de varios días de muy baja a nula precipitación (Cuadro 18), que en el caso de la parte alta de la cuenca del Toyogres, podrían igualmente afectar las características de suelo, entre ellas las láminas de almacenamiento; justificando así los picos y valles mostrados por la Figura 38.

El anterior razonamiento, no puede sin embargo explicar la alta variabilidad de **dimp** y **dper** en la cuenca del Zopilote, donde ambos parámetros parecen jugar un papel más relevante que en el caso del Toyogres. Si bien es cierto la compensación de errores es una posible causa de ello, pareciera que el almacenamiento en superficie en relación a los usos meramente urbanos de esta cuenca, cambia más notablemente en virtud de la tipología de la tormenta. Sensibilidades por debajo de 1E-03 se consideran como despreciables y **nimp**, **ncha** y **nper** son sin duda, los parámetros más sensibles en ambos modelos de cuencas. En un intento de correlacionar estos tres parámetros con la intensidad de precipitación de tormenta, es que se establecen las correlaciones mostradas por las Figuras 40 y 41.

Parametro	Tormenta										Promedio	SD	CV
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10			
nimp	0.8940	1.6340	1.5957	0.4830	1.3975	0.9087	0.8152	0.4570	0.7316	0.8584	0.9775	0.424	43.373
nper	0.0410	0.0392	0.0214	0.0378	0.0459	0.0255	0.0565	0.0347	0.0474	0.0796	0.0429	0.016	38.322
dimp	0.0059	0.0196	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.0072	0.0067	0.0042	0.006	148.140
dper	0.0000	0.0065	0.0000	0.0014	0.0031	0.0000	0.0020	0.0016	0.0012	0.0008	0.0017	0.002	118.848
ncha	0.4228	0.3687	0.8125	0.5507	0.6588	0.3454	0.3595	0.3274	0.4570	0.6780	0.4981	0.169	33.836
pimpsbt1	0.0005	0.0017	0.0009	0.0012	0.0024	0.0012	0.0011	0.0007	0.0006	0.0010	0.0011	0.001	49.053
cnsbt1	0.0002	0.0017	0.0000	0.0001	0.0008	0.0008	0.0003	0.0010	0.0006	0.0004	0.0006	0.001	88.180

Cuadro 16. Variabilidad de la sensibilidad de los parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

Parametro	Tormenta										Promedio	SD	CV
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10			
nimp	0.8740	0.8621	0.6269	0.1926	0.9520	2.6442	1.2152	1.7404	2.5184	0.6496	1.2275	0.819	66.718
nper	0.0687	0.0591	0.1080	0.0271	0.2289	0.4003	0.1326	1.1782	0.8929	0.0677	0.3163	0.400	126.447
dimp	0.0355	0.0144	0.0053	0.0031	0.0091	0.0978	0.0255	0.0420	0.0765	0.0125	0.0322	0.032	99.522
dper	0.0127	0.0001	0.0018	0.0676	0.0052	0.0422	0.0017	0.0214	0.0122	0.0008	0.0166	0.022	133.546
ncha	1.7853	0.9531	0.7929	2.0078	2.5895	6.0940	1.9258	2.3130	5.6251	0.6094	2.4696	1.906	77.162
pimpsbt1	0.0019	0.0014	0.0014	0.0029	0.0016	0.0184	0.0128	0.0023	0.0373	0.0015	0.0081	0.012	144.932
cnsbt1	0.0052	0.0061	0.0001	0.0015	0.0005	0.0062	0.0009	0.0012	0.0091	0.0003	0.0031	0.003	103.970

Cuadro 17. Variabilidad de la sensibilidad de los de parámetros calibrados por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Resulta pretencioso, establecer correlaciones para **nimp**, **ncha** y **nper** en ambos modelos de cuenca, todo lo contrario; parecen ser de hecho independientes a la intensidad de precipitación. Como es de esperarse, la dispersión en la cuenca del Toyogres es más alta en virtud de la adaptabilidad del modelo a sus condiciones de uso de suelo y topología de tormenta. Lo anteriormente expuesto concuerda con los resultados mostrados por los Cuadros 14 y 15, donde los CVs de estos tres parámetros son evidentemente más variables en el caso del Toyogres que el caso del Zopilote.

La situación parece no cambiar mucho con respecto a la correlación volumen-parámetros para la cuenca del Zopilote, donde los tres parámetros en cuestión no muestran ninguna relación con el volumen total precipitado (Figura 43). Lo mismo no aplica para la cuenca del Toyogres, donde si bien es cierto **nimp** pareciera mostrar independencia, sí existe una marcada correlación creciente para **nper** y en menor medida para **ncha** (Figura 42). Por lado, sugiere una vez la alta dependencia de **nper** con las condiciones de humedad antecedente y el volumen total precipitado y por otro lado se respalda lo encontrado por Abrahams *et al.* (1994); Wertz *et al.* (1992); Wu *et al.* (1999) donde un aumento del tirante efectivo producto de un mayor volumen escurrido conlleva a una mayor rugosidad compuesta del cauce del río; principalmente como consecuencia de la contribución de vegetación sobre la rugosidad compuesta de la sección. En el cauce del Zopilote, este comportamiento de **ncha** no resulta tan marcado, probablemente porque mucho de la red de drenaje está compuesto de tuberías de concreto con un valor de rugosidad bastante independiente a los aumentos de tirante.

Precipitación en 24 h (mm)	Día del mes	Mes	Precipitación en 24 h (mm)	Día del mes	Mes	Precipitación en 24 h (mm)	Día del mes	Mes
2.8	5	Septiembre	62.2	1	Octubre	6.9	1	Noviembre
1.3	8	Septiembre	32.5	2	Octubre	0.5	5	Noviembre
0.3	9	Septiembre	0.3	7	Octubre	0.6	8	Noviembre
42.7	12	Septiembre	2.8	8	Octubre	14.5	10	Noviembre
0.5	16	Septiembre	23.6	9	Octubre	15.7	12	Noviembre
1.5	17	Septiembre	22.6	10	Octubre	5.1	13	Noviembre
15.2	18	Septiembre	12	11	Octubre	0.3	14	Noviembre
0.8	19	Septiembre	4.6	12	Octubre	1.3	15	Noviembre
5.8	20	Septiembre	1.1	13	Octubre	1.8	16	Noviembre
0.3	21	Septiembre	37.9	14	Octubre	0.3	17	Noviembre
0.3	22	Septiembre	6.4	15	Octubre	0.8	19	Noviembre
3.1	23	Septiembre	11.9	16	Octubre	2.3	21	Noviembre
0.3	24	Septiembre	14.5	17	Octubre	3.6	22	Noviembre
4.6	25	Septiembre	3.1	18	Octubre	1	23	Noviembre
14.7	26	Septiembre	1.8	19	Octubre	10.4	24	Noviembre
0.3	27	Septiembre	53.2	20	Octubre	19.3	25	Noviembre
1.5	28	Septiembre	17.8	21	Octubre	1.3	26	Noviembre
4.1	30	Septiembre	5.6	22	Octubre	1.5	27	Noviembre
			7.1	23	Octubre	1.3	28	Noviembre
			1.1	24	Octubre	0.8	29	Noviembre
			1	26	Octubre	1	30	Noviembre
			5.9	27	Octubre			
			1.8	28	Octubre			
			0.3	29	Octubre			
			6.4	30	Octubre			
			41.4	31	Octubre			

Cuadro 18. Precipitación promedio en 24 horas para el área de estudio en los meses correspondientes.

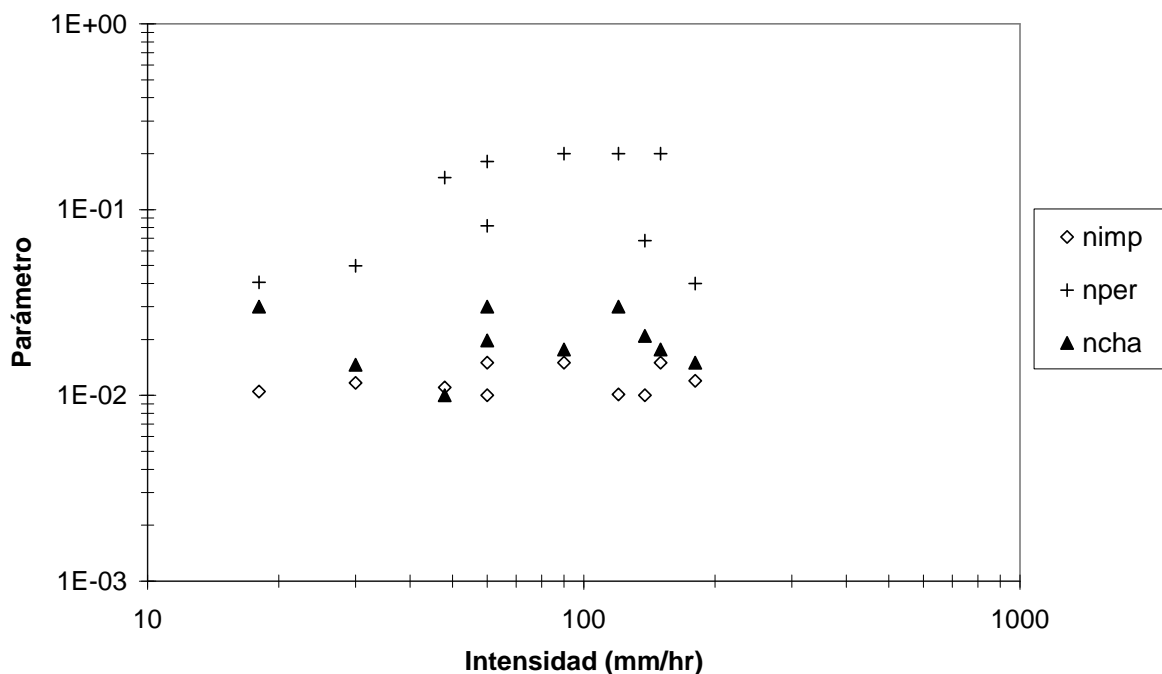


Figura 40. Variación de parámetros del modelo SWMM en función de la intensidad de precipitación por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

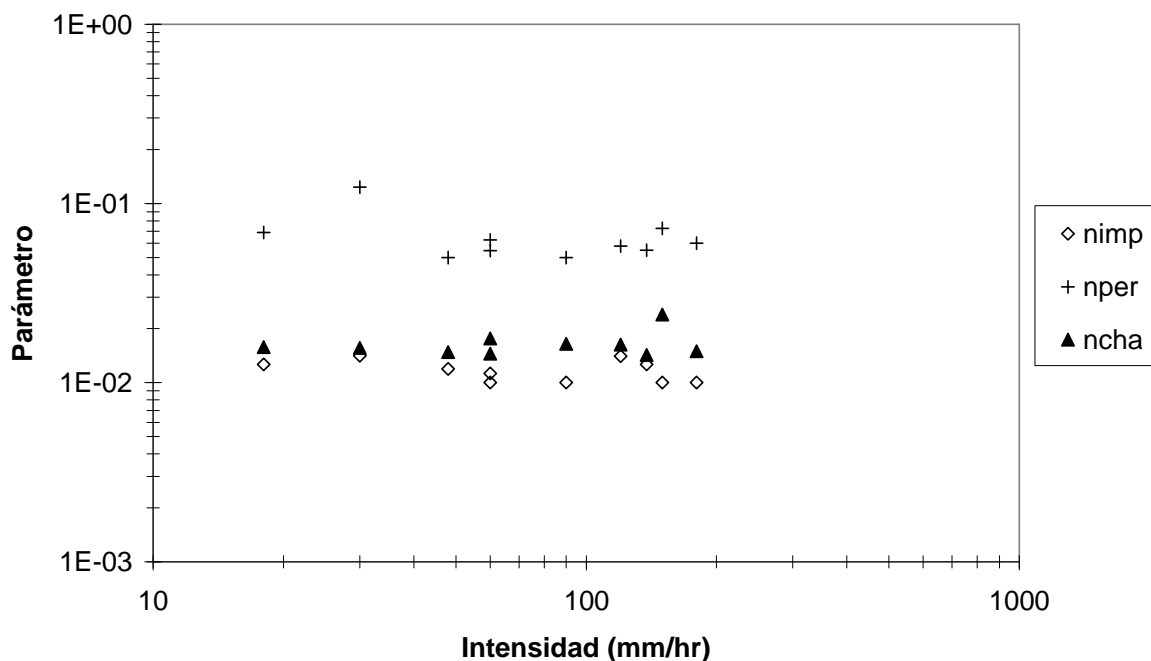


Figura 41. Variación de parámetros del modelo SWMM en función de la intensidad de precipitación por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

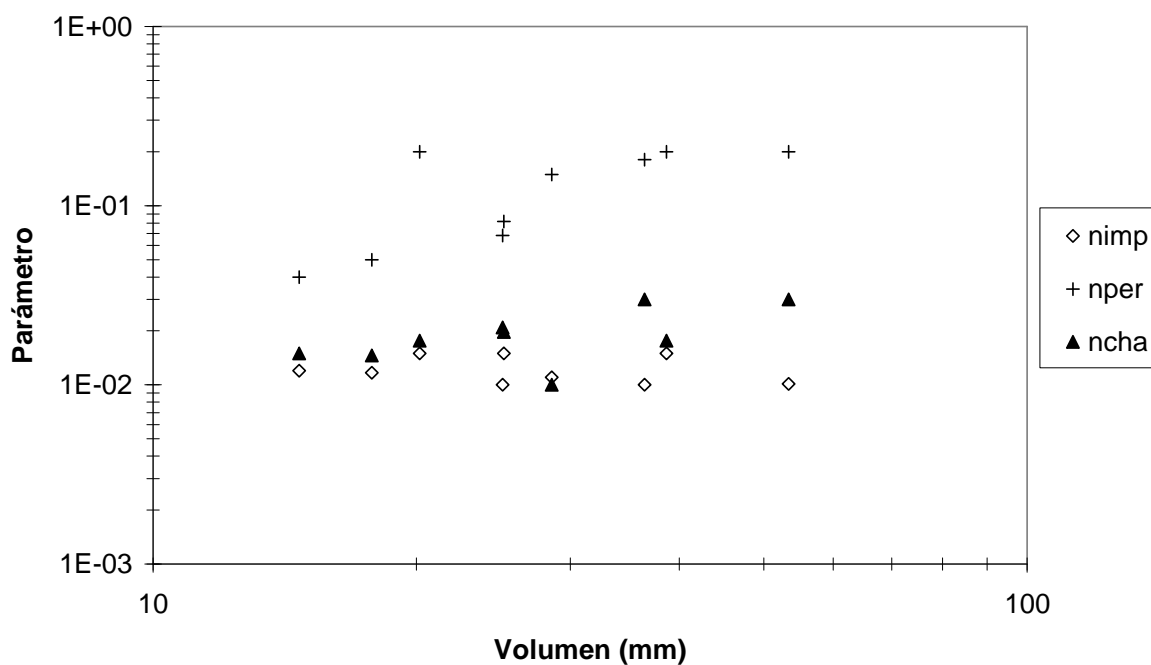


Figura 42. Variación de parámetros del modelo SWMM en función del volumen de precipitación por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca del río Toyogres.

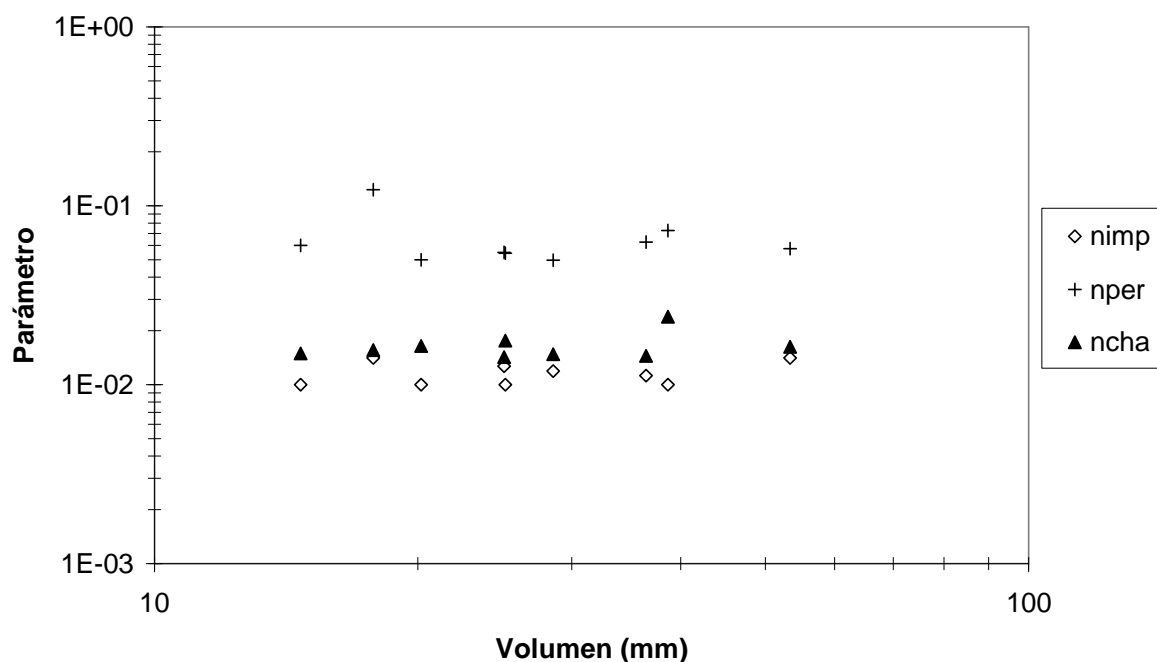


Figura 43. Variación de parámetros del modelo SWMM en función del volumen de precipitación por tormenta para el modelo SWMM en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Proyecciones Futuras con Markov

Cambio temporal de usos del suelo para el periodo 1997- 2011

Durante el periodo 1997-2011 (14 años) el área de estudio experimentó cambios importantes sobre algunos de sus usos (Cuadro 19). No obstante, **HDRES** fue el uso que experimentó un mayor incremento pasando de 6.18% a 11.99% del área total analizada (40 km²). Las Figuras 44 (A) y 44 (B) evidencian una significativa densificación del casco central de Cartago (sector histórico) con una marcada expansión hacia el sector norte (San Blas), sector sur (Dulce Nombre y Agua Caliente) y sector sur-este (Caballo Blanco), en algunos casos a manera de bloques aislados y discontinuos. En otros casos (e.g. Dulce nombre y Agua Caliente) los patrones resultan más sistemáticos y ordenados, principalmente debido a grandes proyectos de interés social (e.g. urbanización Manuel de Jesús Jiménez). El crecimiento en el sector histórico, podría deberse esencialmente a renovación de estructura preexistentes y a la segregación de propiedades relativamente grandes en propiedades más pequeñas. Este fenómeno de aglomeración, conlleva a que se cubra gran parte (si no toda) del área/terreno disponible. **MDRES** tuvo un $\Delta\%$ relativo del 2.47% que en buena medida concuerda con las disminuciones de -1.81% y -0.27% correspondientes a **LDRES** y **PROTEC** respectivamente. En términos generales, el crecimiento de las áreas ligadas directamente a usos residenciales en los últimos 14 años, ha sido importante para la ciudad de Cartago. Si bien es cierto el área actualmente contemplada no cubre en su totalidad los 4 municipios contemplados, sí arroja una muy buena idea de la situación general de esta sección del GAM. El aumento porcentual sobre estos usos y la

disminución de aquellos con mayor facultad de compensación hidrológica (e.g **CROPS** con $\Delta\%$ relativo del -6.83%), tiene importantes repercusiones sobre los coeficientes de escorrentía de las cuencas bajo estudio. En este sentido, se nota también una leve disminución sobre las áreas de protección (**PROTEC**), pasando de 11.90% a 11.63% del área total contemplada; lo que a su vez podría indicar invasión de las áreas de protección a ríos y quebradas.

USO	1997		2011		Cambio 1997-2011
	Area (Ha)	% Area total	Area (Ha)	% Area total	$\Delta\%$ Relativo
HDRES	245.09	6.18	475.21	11.99	5.81
MDRES	212.44	5.36	310.12	7.83	2.47
COMER	15.30	0.39	10.38	0.26	-0.12
INDUS	43.96	1.11	49.80	1.26	0.15
TRANS	240.47	6.07	264.88	6.68	0.62
PROTEC	471.49	11.90	460.87	11.63	-0.27
CROPS	2418.99	61.04	2148.24	54.21	-6.83
LDRES	315.04	7.95	243.27	6.14	-1.81
TOTAL	3962.78	100.00	3962.78	100.00	

Cuadro 19. Evolución temporal de los usos del suelo para el sector central de Cartago para el periodo 1997- 2011.

Cadenas de Markov

A partir de registros temporales disponibles para el periodo 1997-2011, se procedió a ejecutar el módulo de cadenas de Markov de IDRISI-GIS; con lo que se obtuvieron las matrices de probabilidad de transición para el año 2025 del área bajo estudio (Cuadro 20). Estas matrices, representan la base cuantitativa de las estimaciones futuras de cambio de uso/cobertura. En este sentido, resulta interesante notar que existe una probabilidad del 100% de que **HDRES** siga siendo **HDRES**; o lo que es lo mismo, no hay probabilidad de que cambie a ningún otro uso. Por su parte, **MDRES** tiene un 54.2% de probabilidad de convertirse en **HDRES** y tan solo un 7% de pasar a **LDRES**. Por su parte, **LDRES** tiene un 17.2% de pasar a **HDRES** y un 46.6% de pasar a **MDRES**. Estos tres usos, son sin duda los de mayor impacto a nivel de generación de escorrentía. **CROPS** parece variar muy poco, con saltos pequeños de 2.4% y 2.3% a **HDRES** y **MDRES** respectivamente. Por lo contrario, parece haber una tendencia de cambio a **LDRES**, con cúmulos de casas dispersas principalmente en el sector norte de Llano Grande y Tierra Blanca. El resto de los usos, experimentan cambios muy sutiles que podrían perfectamente estar dentro de la incertidumbre espacial de los datos utilizados. Debe de tomarse en cuenta que aunque que la resolución espacial seleccionada fue de 2 m, la resolución de las imágenes TERRA de 1997 fue de 3.6 m, por lo que existe una evidente generalización de la información y pérdida de detalle. Lo anterior también aplica a la mayoría de los mapas de viabilidad mostrados por el Cuadro X (Cuadro X. Factores de peso y objetivos utilizados en el modelo Markov-AC), que incluye los IFAS y las capas espaciales de los planes reguladores propuestas por PRUGAM para los municipios involucrados. Algunas de estas capas presentan resoluciones espaciales de 1:10 000, 1:50 000 e incluso 1:200 000, lo cual evidentemente no compite con la resolución espacial de las imágenes WorldView II.

El Cuadro X3, transforma la matriz de probabilidades a una matriz cuantitativa de cambio de cobertura a nivel de píxel, lo que finalmente se traduce área efectiva por uso.

USO		Periodo actual a 2011								
		HDRES	MDRES	COMER	INDUS	TRANS	PROTEC	CROPS	LDRES	TOTAL
Proyección a 2025	HDRES	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
	MDRES	0.542	0.451	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	1.000
	COMER	0.000	0.272	0.679	0.000	0.000	0.000	0.049	0.000	1.000
	INDUS	0.009	0.144	0.000	0.832	0.000	0.000	0.000	0.014	1.000
	TRANS	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000
	PROTEC	0.005	0.001	0.000	0.000	0.012	0.968	0.000	0.014	1.000
	CROPS	0.024	0.023	0.000	0.005	0.008	0.001	0.888	0.051	1.000
	LDRES	0.172	0.466	0.000	0.006	0.000	0.003	0.000	0.353	1.000

Cuadro 20. Probabilidades de transición con base en las cadenas de Markov para los usos del suelo en el sector central de Cartago para el periodo 2011-2025.

USO		Periodo actual a 2011							
		HDRES	MDRES	COMER	INDUS	TRANS	PROTEC	CROPS	LDRES
Proyección a 2025	HDRES	1188030	0	0	0	0	0	0	0
	MDRES	420437	349484	0	53	0	0	47	5292
	COMER	0	7061	17609	0	0	0	1279	0
	INDUS	1167	17930	0	103636	0	0	0	1767
	TRANS	0	0	0	2	662189	0	0	0
	PROTEC	5128	1376	0	0	13655	1115761	0	16265
	CROPS	129647	125773	0	24799	41775	7205	4767775	273623
	LDRES	104284	283123	0	3903	0	2011	0	214866

Cuadro 21. Número de píxeles estimados a cambiar entre los usos del suelo en el sector central de Cartago para el periodo 2011-2025.

Aplicación de Autómatas Celulares

Los registros históricos, junto con la proyección a 2025 de cambio de cobertura para el área de estudio son mostrados por la Figura 44. Los resultados de la simulación reafirman las tendencias observadas en el periodo 1997-2011, donde la proyección mayor de crecimiento se centra esencialmente en **HDRES** y **LDRES**, con consistentes disminuciones de **MDRES** y **CROPS** (Cuadro 22). Aparte de la densificación del centro histórico de Cartago, puede verse un marcado crecimiento de **HDRES** a lo largo del eje vial que conduce a Tierra Blanca y Cot. Lo mismo pareciera ocurrir a lo largo del eje vial que comunica Cartago con Paraíso. La Figura 45, muestra un resumen del comportamiento de los diferentes usos desde 1997 hasta su proyección en 2025. Nuevamente, se puede apreciar que la tendencia de cambio se centra sobre los usos residenciales en sacrificio del uso agrícola primordialmente; mientras que el resto de los usos experimentan cambios leves.

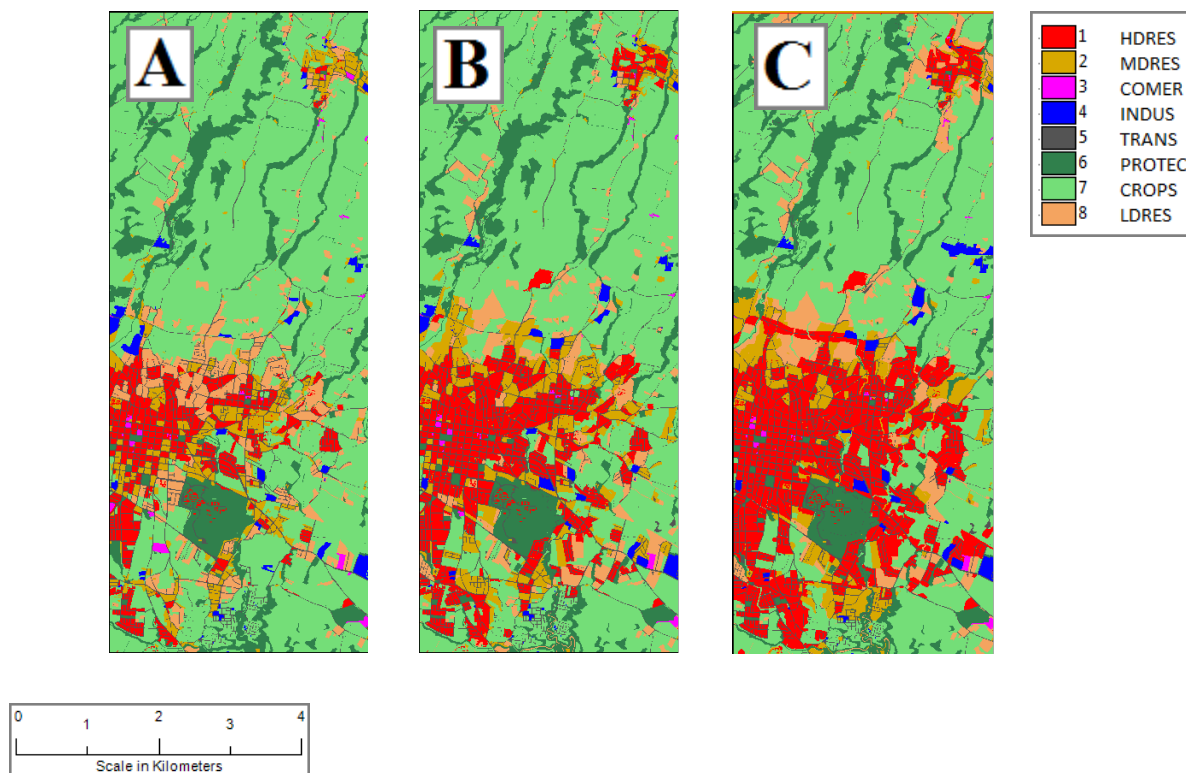


Figura 44. Cambio temporal del uso del suelo propuesto para 2025 (C) con base en los registros históricos de 1997 (A) y 2011 (B).

USO	2011		2025		Cambio 2011-2025
	Area (Ha)	%	Area (Ha)	%	$\Delta\%$ Relativo
HDRES	475.21	11.99	727.76	18.36	6.37
MDRES	310.12	7.83	252.09	6.36	-1.46
COMER	10.38	0.26	9.10	0.23	-0.03
INDUS	49.80	1.26	52.96	1.34	0.08
TRANS	264.88	6.68	274.80	6.93	0.25
PROTEC	460.87	11.63	450.57	11.37	-0.26
CROPS	2148.24	54.21	1913.98	48.30	-5.91
LDRES	243.27	6.14	287.24	7.25	1.11
TOTAL	3962.78	100.00	3968.50	100.00	

Cuadro 22. Proyección de la evolución temporal de los usos del suelo para el sector central de Cartago para el periodo 2011-2025.

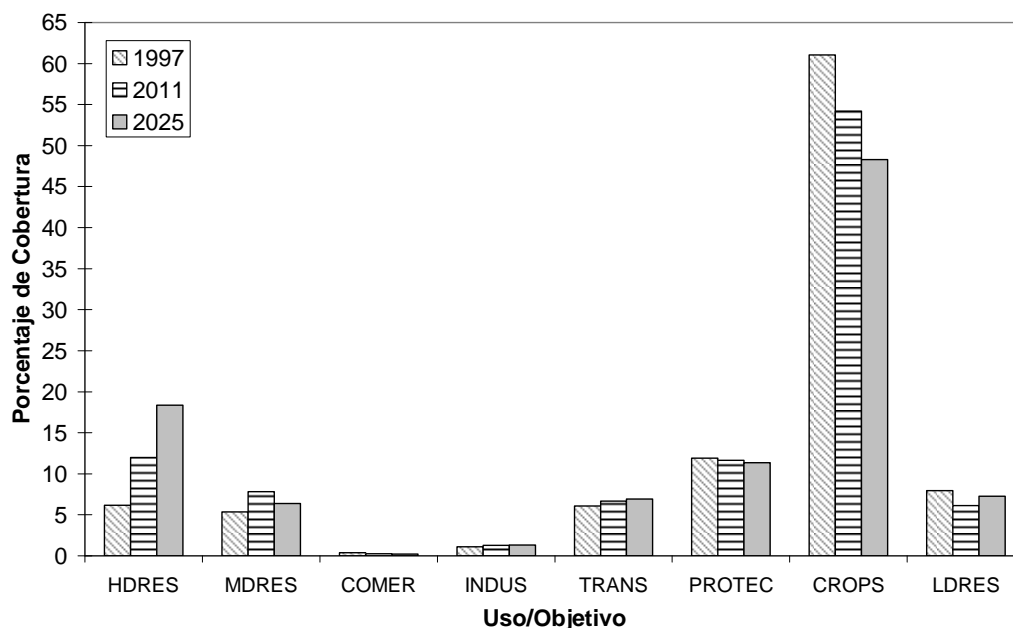


Figura 45. Evolución temporal de los usos del suelo para el sector central de Cartago para los años 1997, 2011 y 2025.

Evaluación y simulación del cambio en el coeficiente de escorrentía superficial

Dado que la validación y calibración del modelo SWMM se realizó con tormentas reales y observaciones reales de flujo, se pretende pues evaluar el impacto que el cambio del coeficiente de escorrentía superficial pudiese tener sobre la respuesta real de las cuencas contempladas en este estudio. En virtud de lo señalado y en relación a la estructura interna de SWMM, el parámetro clave a evaluar es precisamente el porcentaje de área impermeable o **pimp**, ya que con base en el análisis de sensibilidad, el mismo no guarda mayor correlación con el resto de los parámetros. La Figura 46 muestra la correlación temporal propuesta del parámetro **pimp** para el periodo 2011-2025.

Es evidente que la tendencia al crecimiento es mucho más marcada para la cuenca del Zopilote que para la cuenca del Toyogres, lo cual también es gráficamente respaldado por la Figura 46. Con el propósito de realizar una simulación temporal sobre las consecuencias que este aumento de **pimp** podría tener en ambas cuencas, se decidió utilizar la tormenta T6 (Cuadro 10). La razón de utilizar una tormenta real, radica en la dificultad de apegarse a tormentas sintéticas cuyo comportamiento no refleja en lo absoluto las particularidades de una tormenta real. En este sentido, SWMM fue nuevamente cargado con el promedio simple de los parámetros calibrados y se actualizó el valor de **pimp** para cada subcuenca contemplada. El hidrograma mostrado por la Figura 47, muestra el cambio proporcional que exhibiría la cuenca del Toyogres ante el eventual aumento de **pimp** para 2025.

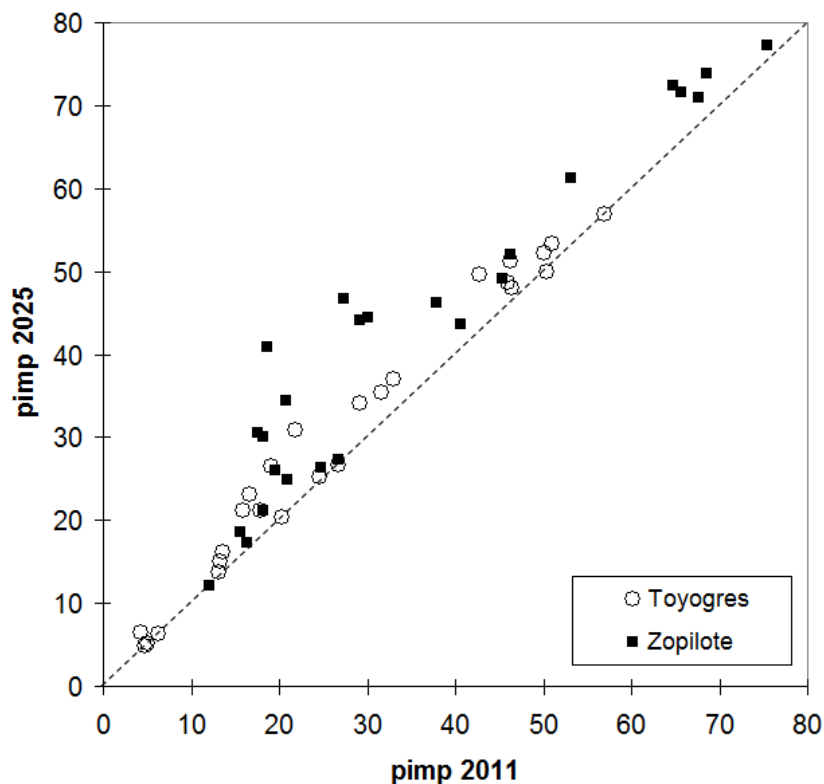


Figura 46. Correlación temporal propuesta del parámetro **pimp** para el periodo 2011-2025.

Queda claro que la afectación directa es sobre el caudal pico, pasando de $60.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2011 a $70.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2025, o sea; un aumento relativo de 16.9%. Desde el punto de vista hidráulico, este aumento no compromete la red de drenaje del río Toyogres en ninguna de las secciones caracterizadas en campo.

La situación es similar para la cuenca del Zopilote (Figura 48), donde el caudal pico pasaría de $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$ a $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$, o lo que es lo mismo un aumento relativo de 37.7% a 2025. Queda claro también que el volumen escurrido aumentaría considerablemente, casi de forma proporcional en virtud de lo mostrado por las ecuaciones (2) y (3).

En resumen, si bien es cierto, el aumento en el porcentaje de área impermeable, consecuencia del aumento proporcional sobre **pimp** podría parecer relativamente alto, en la cuenca del Toyogres, el aumento sobre su caudal pico no es tan importante en el tanto que los demás usos de carácter meramente permeable (**crops** y **protect** principalmente) con gran capacidad de almacenamiento permanecen relativamente constantes por lo que tiende a haber un proceso de compensación o buffer de la escorrentía. La preocupación mayor pues, se centra sobre la red de drenaje de la quebrada Zopilote, la cual sí experimenta un incremento considerable en el caudal pico y el volumen escurrido.

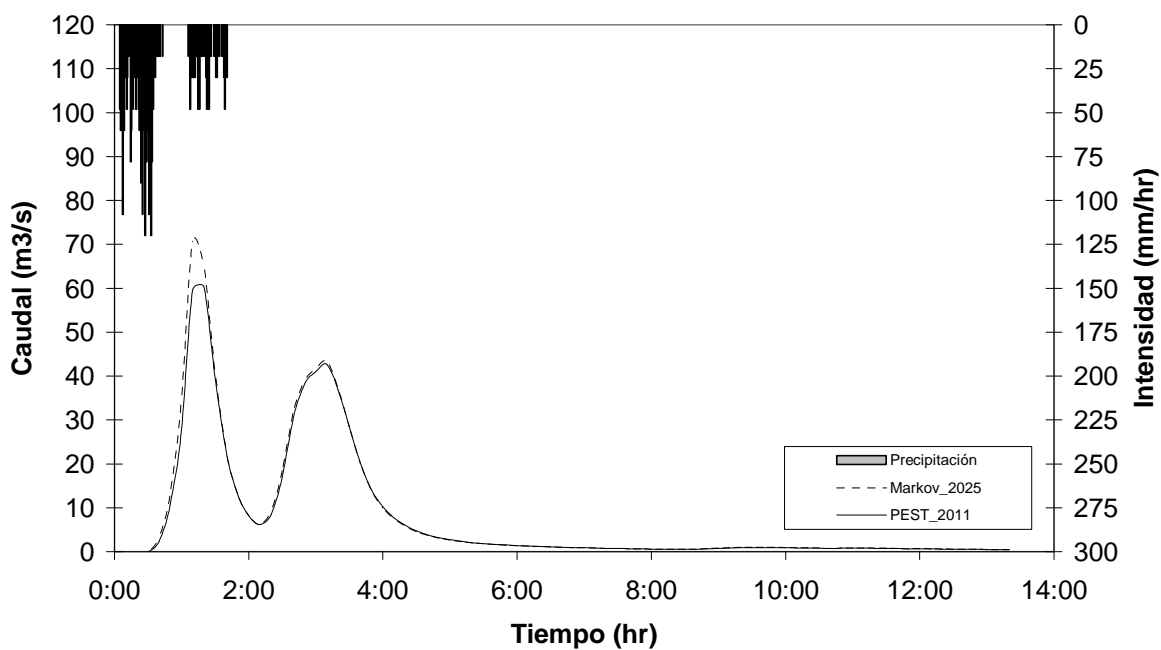


Figura 47. Comparación entre los hidrogramas modelados por SWMM para la tormenta T5 para los años 2011 y 2025 en la cuenca del río Toyogres.

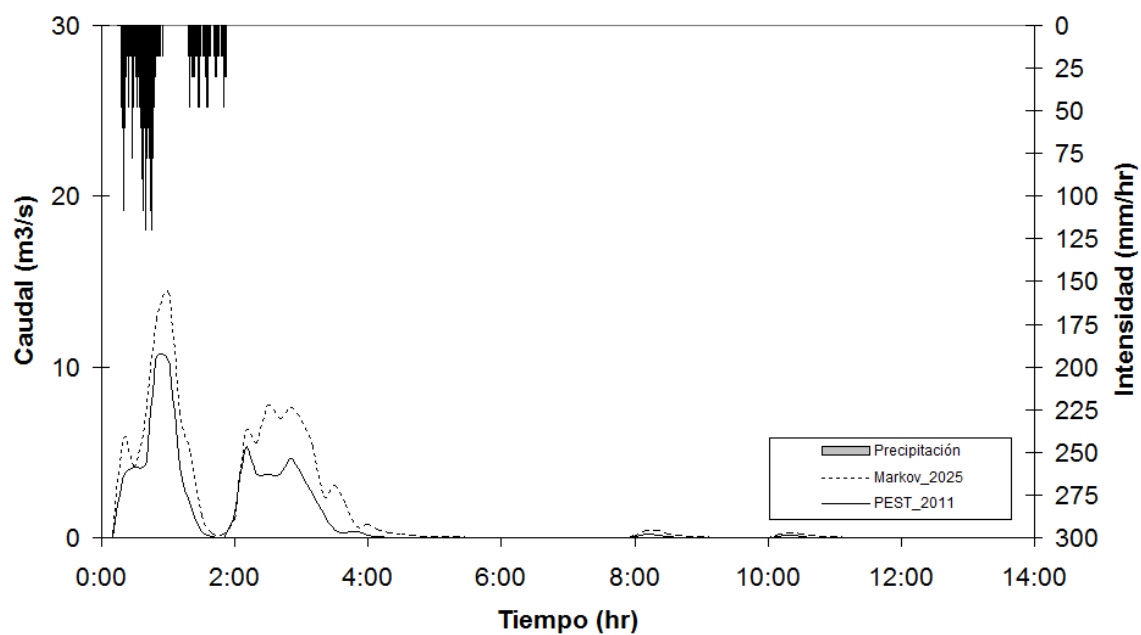


Figura 48. Comparación entre los hidrogramas modelados por SWMM para la tormenta T5 para los años 2011 y 2025 en la cuenca de la quebrada Zopilote.

Evaluación de la capacidad hidráulica

Los resultados anteriormente expuestos, evidencian la alta variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación en el área de estudio. Consecuentemente, la respuesta de las cuencas es igualmente variable. La utilización de tormentas sintéticas de diseño en la evaluación de una cuenca con las dimensiones de la del río Toyogres carece de sentido práctico. La utilización de tormentas de diseño, debería estar rezagada a áreas relativamente pequeñas y con una censurable concentración de infraestructura, principalmente redes de alcantarillado pluvial o incluso sanitario. En virtud de lo señalado, Se decidió evaluar la red de drenaje de la quebrada zopilote contra una tormenta sintética de diseño confeccionada a partir de las curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF) suministradas por el IMN (IMN 2009). La metodología utilizada fue la de bloques alternos y se seleccionaron dos diferentes periodos de retorno, 5 y 20 años. Para 5 años se utilizó el promedio simple de los parámetros calibrados para 2011, mientras que para el periodo de retorno de 20 años, se utilizaron aquellos valores obtenidos a través del modelo de AC-Markov.

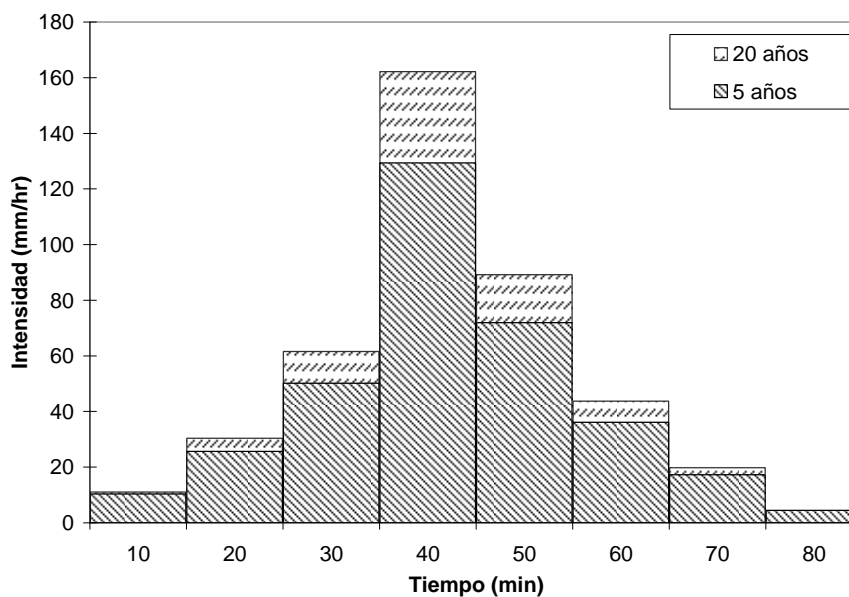


Figura 49. Hietogramas sintéticos de tormentas para la cuenca de la quebrada Zopilote en periodos de retorno de 5 y 20 años.

Con intensidades máximas sostenidas en el orden de 130 mm/hr durante 10 minutos para el periodo de retorno de 5 años, se identifican gran cantidad de nudos inundados en la Figura 50_A que claramente marcan una grave deficiencia hidráulica de la red de drenaje. La situación no es muy diferente para el periodo de 20 años, donde la propagación de los nudos presurizados no hace más que aumentar (Figura 50_B). Aun cuando estas tormentas son irreales y muy poco probables, sí arrojan indicadores de comportamiento importantes y sugieren la necesidad de una actualización integral del sistema de alcantarillado pluvial ligado al sector de Dulce Nombre. El rediseño de tal sistema más allá de los objetivos planteados en éste proyecto.

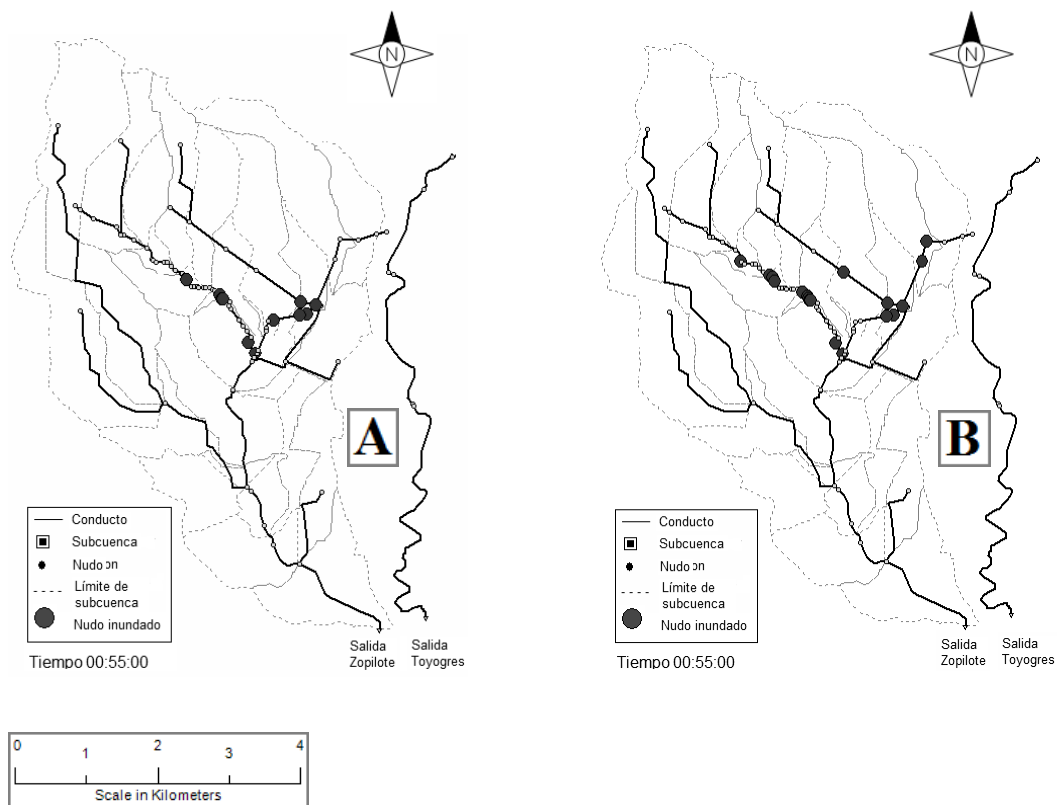


Figura 50. Comportamiento hidráulico de los nudos sobre la red de drenaje de la cuenca de la quebrada Zopilote en periodos de retorno de 5 y 20 años.

5_CONCLUSIONES

El modelo hidrológico SWMM fue aplicado a un caso de estudio que incluyó el análisis de dos cuencas hidrológicas en el área urbana de la ciudad de Cartago, Costa Rica. La suite de calibración y optimización paramétrica PEST, la cual se fundamenta en los algoritmos de Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) fue utilizada en la optimización de parámetros, calibración y análisis de sensibilidad de SWMM.

La parameterización inicial de SWMM, se fundamentó en datos espaciales de alta resolución derivados de imágenes multiespectrales tomadas por los satélites WorldView I y WorldView II; así como de valores típicos encontrados en la literatura.

En el proceso de calibración con PEST, se utilizaron 10 eventos secuenciales de tormenta registrados por tres estaciones meteorológicas durante la estación lluviosa del año 2011. La evolución de los parámetros, junto con su sensibilidad relativa fue analizada para cada evento seleccionado haciendo uso de los hidrogramas observados. El análisis de dichos eventos indica que tanto los parámetros como las sensibilidades relativas y por ende su importancia, cambian en relación a la tipología de cada tormenta y con el régimen de precipitación del año hidrológico; lo cual a su vez indica que no existe un único set óptimo de parámetros que se adapte satisfactoriamente a todas las condiciones.

La dinámica paramétrica de un modelo totalmente distribuido, como SWMM no puede ser ignorada cuando se trabaja con eventos de tormenta únicos e independientes. Lo anterior es imprescindible si se pretende mejorar la confiabilidad de las predicciones y alcanzar una mejor representación de los procesos.

Los coeficientes de rugosidad de Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable (**nimp**), flujo superficial sobre el área permeable (**nper**) y tránsito hidráulico (**ncha**), resultaron los parámetros más sensitivos de todos; siendo estos últimos de carácter totalitario. El comportamiento de estos parámetros es parcialmente dependiente a la intensidad y volumen total de precipitación en relación a los usos y coberturas que dominan el espacio de cada cuenca analizada. Su comportamiento también sugiere que existe una profunda dependencia con respecto al estado de humedad antecedente del suelo y los estados de flujo hidráulico, tanto a nivel de superficie como de tránsito hidráulico.

Aun cuando los coeficientes de variación de éstos parámetros son relativamente altos, SWMM demostró ser lo suficientemente flexible para adaptarse satisfactoriamente a todas las tipologías de tormenta analizadas; dado que las eficiencias medias NS en calibración oscilan entre 0.85 y 0.80; mientras que en validación oscilan entre 0.87 y 0.77 para las cuencas del Toyogres y el Zopilote respectivamente. De la misma manera los errores volumétricos, de caudal pico y tiempo pico, no superan el 15% en ninguno de los casos.

Lo anterior es de suma importancia, ya que si bien es cierto, los parámetros sensitivos de SWMM no son enteramente físicos y varían en bandas relativamente anchas,

demuestran que el modelo puede ser utilizado incluso en condiciones donde no existen datos observados para la calibración o validación del mismo dada la alta flexibilidad del modelo hidráulico de onda cinemática de SWMM. No debe dejarse de lado el hecho de que las observaciones de caudal, no están exentas de errores, ya que su deducción depende de una medida indirectas de velocidad y nivel piezométrico.

Mucho más importante aún, es el hecho de que la eficiencia general SWMM depende en gran medida de la calidad y resolución espacial-temporal de la precipitación. Quedó demostrado que los patrones de intensidad y distribución espacial de la precipitación son altamente variables, al punto que tres estaciones meteorológicas fueron incapaces de captar adecuadamente la precipitación total durante algunos eventos. Es de suma importancia hacer notar que la resolución temporal de la precipitación acarrea una profunda afectación sobre la respuesta de SWMM, principalmente en relación a los hidrogramas proyectados. El grado de generalización de la información, desde 1 minuto hasta 30 minutos garantiza un marcado deterioro sobre la respuesta del modelo, quedado claro nuevamente que los eventos de tormentas en la zona de estudio presenta intensidades muy altas en tiempos muy cortos. Lo anterior es preocupante, dado que el acceso a la información meteorológica es sumamente restringido en Costa Rica.

Los parámetros distribuidos, tomados en cuenta durante la calibración inicial con PEST, exhibieron sensibilidades órdenes de magnitud más bajas que aquellas presentadas por los coeficientes de rugosidad. Esto demuestra que la calidad de los datos espaciales fue la adecuada en la parameterización de SWMM, en el tanto que se logra dar una interpretación razonablemente física de tales parámetros distribuidos.

Se consideran igualmente satisfactorias las labores de fotointerpretación, aerotriangulación e hidroprocesamiento basados en los datos raster, mediante la combinación de diversos geoprocursos GIS. Se demostró en la resolución espacial de los modelos de elevación digital (DEMs) tienen un profundo impacto sobre la discretización espacial de las áreas tributaria y por ende sobre las condiciones de frontera de la cuenca, especialmente si ésta última es de naturaleza urbana; con gran presencia de infraestructura como puentes y líneas de alcantarillado.

Con base en las a proyecciones temporales arrojadas por el modelo de Cadenas de Markov / Autómata Celular, pudo determinarse que para el año 2025, el aumento sobre el caudal pico para una tormenta de alta intensidad como la T5 sería de alrededor del 15% para el cauce del Toyogres y de 26% para el cauce del Zopilote, siendo este último de gran importancia. Queda claro que la red de drenaje de esta cuenca exhibe serías limitaciones, que aun mediante la aplicación de tormentas sintéticas, presenta una agravada incapacidad de tránsito hidráulico. Los estudios específicos alrededor de este punto quedan por fuera de los alcances de este proyecto.

6_RECOMENDACIONES

Resulta de gran importancia evaluar la factibilidad de regionalizar los resultados de este estudio a cuencas urbanas no instrumentadas de mayor área y cobertura. En este sentido, actualmente se encuentra aprobada a nivel de escuela, una propuesta de investigación titulada "*Regionalización hidrológica de parámetros asociada a la utilización de modelos determinísticos aplicados a cuencas urbanas de alta pendiente*" cuyo propósito es precisamente validar esta hipótesis. En este sentido, se cuenta con toda la información espacial y los equipos necesarios para cubrir el área de drenaje de la cuenca del río Navarro, que incluye a lo interno toda el área urbana de Cartago. Dicho proyecto, representa la segunda etapa del proyecto en discusión.

La clasificación de las imágenes multiespectrales de los satélites WorldView fue realizada a mano para esta etapa. Sin embargo, en la segunda etapa, dado que se trata de más de 200 Km², se estarán utilizando los algoritmos de clasificación automática de ERDAS Imagine. Para ello, es necesario el reconocimiento / validación en campo de áreas de control y la aplicación de controles geodésicos.

Tomando ventaja de tan extensa área de estudio, se pretende colaborar fuertemente con el ICE en la inclusión de la modelación de arrastre de sedimentos/nutrientes en la cuenca del río Navarro, ya que ésta desemboca en el embalse de Río Macho. Lo anterior, puede a la larga derivar en estudios económicos muy detallados sobre la proyección operativa de la generación de electricidad en esta zona. Consecuentemente, es sumamente importante profundizar en la validación del modelo de Cadenas de Markov / Autómata Celular, ya que actualmente se cuenta con una sola simulación a 2025 en una zona muy reducida.

La evaluación de métodos de interpolación espacial de la precipitación más robustos sobre el área de estudio del Navarro es imperante en un área de tal extensión. Se pretende la evaluación de métodos geoestadísticos de interpolación en el ambiente geoespacial R+.

Lo anterior de suma importancia en el tanto que existe una necesidad inherente de mejorar las técnicas de generación de tormentas sintéticas de diseño, que puedan arrojar estimaciones más confiables sobre avenidas máximas. A su vez, esto permitiría darle al modelo SWMM un papel más activo como herramienta de evaluación y predicción del riesgo; así como de una mayor utilidad en el dimensionamiento y evaluación de obras hidráulicas como puentes y sistemas de alcantarillado.

7_REFERENCIAS

A.H. Elliott, S.A. Trowsdale. 2007. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software* 22 (2007) 394 e 405.

Abrahams, A.D., Parsons, A.J. & Wainwright, J., 1994. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona. *Journal of Hydrology* 156 (1–4),431–446.

Alfred J. Kalyanapu, Steven J. Burian, & Timothy N. McPherson. 2009. Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology*. Vol.9, No.2.

Arabi, M., Govindaraju, RS. & Hantush, MM. 2007 A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practice. *J. Hydrol.* 333, 459-471.

Aronica, G., Freni, G., Oliveri, E., 2005. Uncertainty analysis of the influence of rainfall time resolution in the modelling of urban drainage systems. *Hydrol. Process.* 19 (5), 1055–1071.

Bahremand, A. & de Smedt, F. 2010 Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. *J. Wat. Res. Mngmnt.* 24 (12), 2869-2880.

Baltsavias P. & Stallmann D., 1993. SPOT Stereo matching for Digital Terrain Model generation, 2nd Swiss Symposium on Pattern Recognition and Computer Switzerland.Vision, Zürich.

Barco, J., Wong, K.M. & Stenstrom, M.K. 2008. Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment. *ASCE J. Hydraul. Eng.* 341 (3-4), 207-221.
Barredo, J. 1996. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio*. Madrid: RA-MA Editorial.

Beckera, A. & Braunb, P. 1999. Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 217 (1999) 239–252.

Beven, K. & Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process.* 6, 279-298.

Bloschl, G., & Sivapalan, M. 1995. Scale issues in hydrological modeling: A review, *Hydrol. Processes*, 9, 251–290, doi:10.1002/hyp.3360090305.

Böhner, J., McCloy, K.R. & Strobl, J. 2006. *SAGA Analysis and Modelling Applications*. Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol.115, 130pp.

Boyko, O., Trebushny, D. 2006. Application of a physically based distributed rainfall-runoff model (TOPKAPI-IMMSP) to gauged and ungauged mountainous catchments of ranscarpathean region, Ukraine. *Geophys Res. Abstr* 8:07964.

Camorani, G., Castellarin, A., Brath, A. 2005. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth* 30 (2005) 561–574.

Ceballos, A. & Schnabel, S. 1998. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *Journal of Hydrology* 210, 146–160.

Choi, K.S. & Ball, J.E. 2002. Parameter estimation for urban runoff modelling. *Urban Water* 4:31-41.

Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. 1988. *Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York.

Christensen, S. & Doherty, B. 2008 Predictive error dependencies when using pilot points and singular value decomposition in groundwater model calibration. *Adv. Water Resour.* 31 (2008), 674-700.

Cuartero, A., Felicísimo, A.M., Ariza, F.J., 2004. Accuracy of DEM Generation from Terra- aster Stereo Data, XXth ISPRS Congress. *Geo-Imagery Bridging Continents*, Istanbul, Turkey, pp. 559.

Doherty, J. 2005. *PEST: model independent parameter estimation Users Manual*. Watermark Numerical Computing, Brisbane.

Dongquan, Z., Jining, C., Haozheng, W., Qingyuan, T., Shangbing, C. & Zheng, S. 2009. GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau. *Environmental Earth Sciences*. Volume 59, Number 2 (2009), 465-472.

Du, J.K., Xie, S.P., Xu, Y.P., Xu, C.Y., Singh, V.P. 2007. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *J Hydrol* 306:334–346.

Duan, Q., Sorooshian, S. & Gupta, V. K. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models. *Water Resour. Res.* 24 (7), 1163-1173.

Eastman, J. 2003. *IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing* . Worcester, MA: Clark Labs, Clark University.

Fang, T. & Ball, J. E. 2007. Evaluation of spatially variable control parameters in a complex catchment modelling system: a genetic algorithm application. *J. Hydroinf.* 9 (3), 163-174.

Forte, F. Strobl, R. O. Pennetta, L. 2006. A methodology using GIS, aerial photos and remote sensing for loss estimation and flood vulnerability analysis in the Supersano-Ruffano-Nociglia Graben, southern Italy. *Environmental Geology*. 2006 (50) 4. 581-594.

Gallagher, M.R. & Doherty, J. 2007 Parameter interdependence and uncertainty induced by lumping in a hydrologic model. *Wat. Res. Res.* 43 (5), 1-18.

Gaur, M.L., Mathur, B.S. 2003. Modeling event-based temporal variability of flow resistance coefficient. *Journal of Hydrologic Engineering* 8 (5), 266–277.

Goudie, A. 1990. *The human impact on the natural environment*, 3rd ed. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Guo,C.Y & Urbonas, B. 2009. Conversion of Natural Watershed to Kinematic Wave Cascading Plane. *J. Hydrologic Engrg.* Volume 14, Issue 8, pp. 839-846.

Gupta, V.K., Sorooshian, S., 1985. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrological models. *J. Hydrol.* 81, 57–77.

Harremoës, P., Madsen, H. 1999. Fiction and reality in the modelling world-balance between simplicity and complexity, calibration and identifiability, verification and falsification. *Water Sci. Technol.* 39 (9), 1–8.

Helming, K., Roth, C.H., Wolf, R., Diestel, H., 1993. Characterization of rainfall–microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology* 6 (3), 273–286.

Henríquez, C., Azócar, G. & Aguayo, M. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2006. Nº 36, p. 61-74.

Hogue, T., Gupta, H. & Sorooshian, S. 2006 A User-Friendly approach to parameter estimation in hydrologic models. *J. Hydrol.* 320 (1-2), 202-217.

Hong, Y, R.F. Adler, A. Negri, & G.J. Huffman. 2007. Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall estimation, *Journal of Natural Hazards*, 43(2).

Hsu, M.H., Chen, S.H. & Chang, T.J., 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. *J. Hydrol.* 234 (1–2), 21–37.

Huber, W. & Dickinson, R. 1988. *Storm Water Management Model Version 4, Part A: User's Manual*. EPA\600\3-88\001a. US Environmental Protection Agency.

Immerzeel, W.W. & Droogers, P. 2008 Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *J. Hydrol.* 349 (3-4), 411-424.

Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica. 2008. Sistema de Referencia CR05 y Proyección Transversal Mercator para Costa Rica CRTM05. Unidad Ejecutora, Programa de Regularización de Catastro y Registro.

Instituto Meteorológico Nacional, IMN. 2009. Atlas Climatológico de Costa Rica.

ITC. 2001. ILWIS 3.0 Academic User's Guide. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Enschede, The Netherlands.

Jain, M.K., Kothiyari, U.C., & Ranga Raju, K.G. 2004. A GIS based distributed rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 299 (1–2), 107–135.

Karl K. Lee & John C. Risley. 2002. Estimates of Ground-Water Recharge, Base Flow, and Stream Reach Gains and Losses in the Willamette River Basin, Oregon. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 01–4215.

Koppel, A. & Vassiljev, A. 2009 Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age. *Adv. Eng. Softw.* 40 (8), 659-664.

Kumar, S.M., Narasimhan, S. & Bhallamudi, S.M. 2009 Parameter Estimation in Water Distribution Networks. *J. Wat. Res. Mngmnt.* 24 (6), 1251-1272.

MAG. 1989. Mapa de suelos de Costa Rica, escala 1:200 000. Preparado para FAO, Centro Científico Tropical (CCT).

Maneta, M.P.; Pasternack, G.B., Wallender, W.W.; Jetten, V. & Schnabel, S. 2007. Temporal instability of parameters in an event-based distributed hydrologic model applied to a small semiarid catchment. *Journal of Hydrology* (2007) 341 , 207– 221.

Mannina, G., Viviani, G. 2010. An urban drainage stormwater quality model: Model development and uncertainty quantification. *Journal of Hydrology* 381 (2010) 248–265.

Marcel van der Perk, O.S., 2003. Simulation of event-based and long-term spatial redistribution of Chernobyl-derived radiocae-sium within catchments using geographical information system embedded models. *Hydrol. Process.* 17 (5), 943–957.

Maslia, M.L., Suárez-Soto, R.J., Wang, J., Aral, M.M., Faye, R.E., Sautner, J.B., Valenzuela, C. & Grayman, W.M. 2009 Analysis of groundwater flow, contaminant fate and transport, and distribution of drinking water at Tarawa Terrace and vicinity, U.S. Marine Corps Base Camp Lejeune, North Carolina: Historical Reconstruction and Present-Day Conditions. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, Georgia.

Mays, L.W. 2000. Water distribution systems handbook. McGraw-Hill, New York.

MINAE, 2008. Manual de Instrumentos Técnicos para el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (Manual de EIA). DECRETO N° 32967-MINAE. MINISTRO DEL AMBIENTE Y ENERGÍA.

MINAE-CENIGA. 1998. Información Cartografica de la Mision TERRA-Costa Rica. Ministerio de Ambiente Energía y Minas.

Moore, I.D., Grayson, R.B. & Ladson, A. R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrol. Process.*, 5(1), 3–30.

Moradkhani, H. & Soroosh, S. 2008. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. *Hydrological Modelling and the Water Cycle*. Volume 63, Part 1, 1-24.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I and a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282e290.

Negri, A; Burkardt, N.; Golden, J.H.; Halverson, J.B.; Huffman, G.J.; Larsen, M.C.; McGinley, J.A.; Updike, R.G.; Verdin, J.P; Wieczorek, J.F. 2004. The Hurricane-Flood-Landslide Continuum, *Bulletin of American Meteorological Society*. (doi:10.1175/BAMS-86-9-1241).

Park, S.Y; Lee K & Park, I.H. 2008. Effect of the aggregation level of surface runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. *Desalination* 226 (2008) 328–337.

Pontius, R. & Malanson, J. 2005. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*. N° 19, Vol. 2, p. 243-265.

PRUGAM. 2008. Planificación regional y urbana de la Gran Area Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica. Estudio sobre Base Territorial y Zonificación Ambiental para la GAM (PROYECTO I-O-0205-06-IT-PRUGAM) INFORME FINAL.

Retana, J.A; Villalobos, R. 2006. Eventos extremos Meteorológicos en linda vista valle del Guarco, Cartago. Instituto Meteorologico Nacional, Costa Rica.

Rientjes, T.H.M. 2010. Modelling in Hydrology. Department of Water Resources. Fc. Of Geo-Information Science and Earth Observaction. University of Twente.

Ritter, J.B., 1992. Application of field infiltration data to hydrologic model parameterization: an example from drainage basins disturbed by surface mining. *Journal of Hydrology* 134 (1–4), 173–202.

Rossmann L.A. 2007. Stormwater Management Model User's Manual, Version 5.0. U.S. Environmental Research Agency. EPA/600/R-05/040 Revised June 2007.

Seth, I., Soonthornnonda, P., Christensen, E.R. 2006. Use of GIS in urban storm-water modeling. *J Environ Eng* 32(12):1550–1552.

Siva Subramanian, K.S., Amitabh, S. & Manda, S. 2003 Evaluation of Digital elevation models created from different satellite images. *Proceedings of Map India Conference 2003*, New Delhi, India, Jan 2003.

Skahill B.E. 2009. More efficient PEST compatible model independent model calibration. *J. Env. Model. Softw.* 24 (2009), 517-529.

Skahill, B.E. & Doherty, J. 2006 An advanced regularization methodology for use in watershed model calibration. *J. Hydrol.* 327 (3-4), 564-577.

Skahill, B.E. 2009. More efficient PEST compatible model independent model calibration. *J. Env. Model. Softw.* 24 (2009), 517-529.

Smith, J.A., Baeck, M-L., Meierdiercks, K.L & Nelson, P.A. 2005. Field studies of the storm event hydrologic response in an urbanizing watershed. *Water Resources Research.* (41), W10413, doi:10.1029/2004WR003712, 2005.

Temprano, J., Arango, O., Cagliaio, J., Suárez, J. & Tejero, I. 2006. Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water SA* Vol. 32 No. 1. ISSN 0378-4738.

Theobald, D. & Hobbs, N. 1998. Forecasting rural land-use change: a comparison of regression and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modelling.* N° 2, Vol.1, p. 62-82.

Tischler, M., Garcia, M., Peters-Lidard, C., Moran, M.S., Miller, S., Thoma, D., Kumar, S. & Geiger, J. 2007 A GIS framework for surface-layer soil moisture estimation combining satellite radar measurements and land surface modeling with soil physical property estimation. *J. Env. Model. Softw.* 22 (6), 891-898.

Tsihrintzis V, Hamid R (1998) Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM. *Hydrol Process* 12(2):311–329.

Veihe, A. et al, 2001. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. *CATENA.* 44 (3), 187–203.

Wanielista, M. P. & Youssef, Y. A. 1993, *Stormwater Management*, JohnWiley& Sons, Inc., New York, U.S.A.

Watry, G., Ames, D.P. Michaelis, C. 2007. *Quick Guide to MapWindow GIS Desktop Application.*

Weltz, M.A., Arslan, A.B. & Lane, L.J. 1992. Hydraulic roughness coefficients for native rangelands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118 (5), 776–790.

Weltz, M.A., Arslan, A.B., Lane, L.J., 1992. Hydraulic roughness coefficients for native rangelands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118 (5), 776–790.

Weng, Q. 2001. Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. *Environmental Management*. 28(6):737-748.

Wilkie, D.S. 1990. GPS Location Data: An Aid to Satellite Image Analyses of Poorly Mapped Regions. *International Journal of Remote Sensing*, 11(4): 653-658.

Williams, J.R. 1995. Chapter 25: The EPIC model. p. 909-1000. In V.P. Singh. (ed.) *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.

World Disasters Report, 2003: International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, p239.

Wu, F.C., Shen, H.W. & Chou, Y.J. 1999. Variation of rough-ness coefficients for unsubmerged and submerged vegeta-tion. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 125 (9), 934–942.

Wu, F.C., Shen, H.W. & Chou, Y.J., 1999. Variation of rough-ness coefficients for unsubmerged and submerged vegeta-tion. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 125 (9), 934–942.

Yu, P.S., Yang, T., Chen, S,J. 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. *J Hydrol* 244:43–59.

Zhou, G. & Liebhold, A. 1995 Forecasting the Spatial Dynamics of Gypsy-Moth Outbreaks Using Cellular Transition Models. *Landscape Ecology*. N° 10, Vol.3, p. 177-189.