

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU
RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LOS AÑOS 2000 A 2020 EN
LA CUENCA DE LOS RÍOS QUEBRADA SECA Y BERMÚDEZ.**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**MATÍAS ADRIÁN
CHAVES HERRERA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA
2014**

Esta tesis fue presentada el 2014 como requisito fundamental para optar por el Grado Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Fue aprobada por el Tribunal Examinador constituido por las siguientes personas:

Ph.D. Georges Govaere Vicarioli
Ing. Presidente del Tribunal

Ing. Dra. Alejandra Rojas Gonzáles
Directora de la tesis

Ing. M. Sc. José Francisco Aguilar Pereira
Asesor

Ing. M. Sc. José Pablo Rojas J
Asesor

Ing. M. Sc. Rafael Oreamuno Vega
Miembro Lector

Matías Adrián Chaves Herrera
Sustentante

Fecha 26/04/2014

El suscrito, Matías Adrián Chaves Herrera, cédula 1-1265-615, estudiante de la carrera de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A51600, manifiesta que es autor del proyecto final de graduación **Análisis de los cambios de uso de suelo y su respuesta hidrológica de los años 2000 a 2020 de la cuenca de los ríos Quebrada Seca y Bermúdez**, bajo la dirección de Dra. Alejandra Rojas González, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los sobre los resultados de estas investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos, docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: de acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N °6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de Julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice la información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A Dios poderoso que siempre está a mi lado, ayudándome en situaciones que claramente se notaba su presencia y su guía.

A mi familia por siempre apoyarme y darme alientos, en todos los momentos de mi carrera universitaria.

A mi padre por estar orgulloso de mí y por sus palabras de sabiduría. A mi madre por ayudarme siempre. A mis hermanas, Karla por sus consejos, Jessica por las buenas charlas y a Erika por los divertidos momentos.

Agradecimientos

A la Dra. Alejandra Rojas González directora del proyecto por la valiosa ayuda para realizar un trabajo de calidad y aclarándome todas las dudas que surgían en el proyecto.

Al Ing. José Francisco Aguilar Pereira, por guiarme como gran mentor, tanto en la escogencia del tema, como en tantas veces que me brindo su ayuda en la carrera, colaborando en mi formación como profesional.

A Ing. José Pablo Rojas asesor del proyecto de graduación por las sugerencias y consejos que brindo a lo largo de la investigación.

A Ing. Hermis Murillo Zúñiga, de la unidad de bienes y muebles de la municipalidad de Belén por ser enlace en la municipalidad para el inicio del proyecto.

A Hazel Mora de la Federación de las municipalidades de Heredia por brindarme información actualizada de todo lo que ha sucedido en la cuenca de estudio.

A Dulce Jiménez Espinoza, Esteban Ávila Fuentes y Óscar Hernández Ramírez, de la municipalidad de Belén por brindarme el espacio de reunión y colaboración de información para la tesis.

A Ing. Róger Araya Guerrero, de la municipalidad de Heredia por brindarme información valiosa para realización la investigación.

A las personas encargadas de la municipalidad de San Rafael, Barva, San Joaquín de Flores por brindarme un espacio para conocer las necesidades de la zona.

Al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica por suministrar información pluviométrica de las estaciones del aeropuerto Juan Santamaría, Santa Bárbara y San José. Indispensables para la realización de los modelos hidrológicos.

Índice

Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tablas.....	x
Resumen.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivo general.....	5
1.4 Objetivos específicos:.....	5
Capítulo 2. Marco teórico.....	6
2.1 Sistemas de información geográfica para análisis de cuencas.....	9
2.2 Clasificación de imágenes satelitales.....	10
2.3 Modelación hidrológica.....	13
2.4 Investigaciones realizadas en la zona de estudio.....	14
2.5 Características generales del área de estudio.....	18
2.5.1 Descripción climática del área de estudio.....	19
Capítulo 3. Metodología.....	22
3.1 Visita a las Municipalidades.....	22
3.2 Descripción del cambio de uso de suelo en Quebrada Seca.....	22
3.2.1 Clasificación de imágenes satelitales.....	23
3.3 Modelación hidrológica.....	24
3.3.1 Mapa de número de curva.....	24
3.3.2 Periodos de retorno de la lluvia de diseño.....	28
3.3.3 Hietograma de diseño.....	28
3.3.4 Tiempo de concentración.....	29
3.3.5 Tránsito de avenidas.....	29
3.3.6 Validación y generación de modelos.....	29

Capítulo 4. Investigación local	32
4.1 Referencias históricas de inundaciones en Quebrada Seca.....	32
4.2 Entrevista a la Municipalidad de Belén	33
4.3 Entrevista a la Municipalidad de San Rafael	36
4.4 Entrevista a la Municipalidad de Heredia	37
4.5 Entrevista a Federación de Municipalidades de Heredia	38
4.6 Entrevista CIEDES.....	39
4.7 Conclusiones de las entrevistas	40
Capítulo 5. Cambios en el uso de suelo	42
5.1 Análisis espacio temporal de los escenarios pasados.....	54
5.1.1 Análisis año 2001	54
5.1.2 Análisis año 2008	58
5.1.3 Análisis del año 2012	62
5.2 Escenarios futuros	66
5.2.1 Primer escenario	66
5.2.2 Segundo escenario	69
5.2.3 Conclusiones del análisis temporal a nivel de cuenca.	72
Capítulo 6. Modelación hidrológica	73
6.1 Número de curva para los escenarios pasados	74
6.2. Análisis de la precipitación	79
6.2.1 Análisis de las láminas de precipitación a distintos periodos de retorno	83
6.2.2 Intensidad de las tormentas	87
6.2 Hidrograma sintético triangular de bloque aleatorio.....	89
6.3 Tiempo de concentración	90
6.4 Tránsito de avenidas.....	90
6.5 Validación	93
6.6 Resultados modelación.....	96
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	102

7.1	Conclusiones	102
7.2	Recomendaciones.....	103
	Bibliografía	104
	Anexos	108

Índice de Figuras.

Figura 1. Fotografías de una de las 270 casas afectadas por inundaciones y arrastre de materiales en las cercanías de proyecto Gol, Belén, 2012. Fuente: La Nación, 2007 y La Nación 2012.	4
Figura 2. Distritos que conforman el área de estudio.	20
Figura 3. Perfil Transversal de la Cuenca. Fuente: Google Earth.	21
Figura 4. Perfil Longitudinal de la subcuenca Quebrada Seca. Fuente: Google Earth.....	21
Figura 5. Mapa de suelos de la cuenca Quebrada Seca y Bermúdez.	27
Figura 6. Vista del puente la Bodega mediante Google Earth.....	30
Figura 7. Cuenca de Quebrada Seca-Burío.....	31
Figura 8. Imagen Lansat 7 ETM+ 2001 en color natural.....	43
Figura 9. Imagen Lansat 2001 en color de bandas 457.	44
Figura 10. Histograma de clases contra las 4 primeras bandas, Fuente: Imagen 2008.	46
Figura 11. Porcentaje de área de las clases, clasificación no supervisada.	50
Figura 12. Localización de la fotografías. Fuente: Google Earth.....	53
Figura 13. Porcentaje de cobertura del suelo, año 2001.	56
Figura 14. Porcentaje de impermeabilidad por cantón, año 2001.	56
Figura 15. Mapa Uso de Suelo 2001.....	57
Figura 16. Porcentaje de cobertura por cantón, año 2008.	60
Figura 17. Porcentaje impermeabilización por cantón, año 2008.....	60
Figura 18. Mapa Uso de Suelo 2008.....	61
Figura 19. Porcentaje de uso de suelo por cantón, año 2012.....	64
Figura 20. Porcentaje impermeabilización por cantón, año 2012.....	64
Figura 21. Mapa Uso de Suelo 2012.....	65
Figura 22. Mapa de uso suelo, escenario 1.	68
Figura 23. Mapa de uso de suelo de escenario 2.	71
Figura 24. Topografía de la cuenca.	77
Figura 25. Subcuenca obtenidas.	78
Figura 26. Localización de las Estaciones del IMN.	80
Figura 27. Láminas Máximas Duración 24 horas. Fuente IMN.	82
Figura 28. Caracterización de la Tormenta del 13 Junio 2007	83
Figura 29. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación del Aeropuerto Juan Santamaría.	85
Figura 30. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación San José.....	86

Figura 31. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación Santa Bárbara. Fuente: HidroEsta.	86
Figura 32. Curvas IDF mediante Gumbel de la Estación Aeropuerto.	88
Figura 33. Hietograma triangular de la lámina de tormenta de 100 años y 13 horas de duraciones.	89
Figura 34. Forma del canal de río Quebrada Seca. Fuente: Visita de campo 2013.	92
Figura 35. Forma del canal de río Bermúdez. Fuente: Visita de campo 2013.	92
Figura 36. Registro de la tormenta del 1 de octubre del 2004 en tres estaciones.	93
Figura 37. Hidrograma de la modelación.	94
Figura 38. Cortes transversales de la modelación en HecRas.	94
Figura 39. Corte transversal puente la bodega.	95
Figura 40. Esquema hidrológico de Quebrada Seca.	95
Figura 41. Esquema del modelo hidrológico.	98
Figura 42. Hidrograma de salida por una lámina de 100 años y 12 horas en Quebrada Seca.	99
Figura 43. Hidrograma de salida por una lámina de 100 años y 12 horas en Bermúdez.	99

Índice de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones tiempo de concentración. Fuente: Sol Conservación Servicio, traducido por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú., s.f.)	7
Tabla 2. Ecuaciones para tiempo de concentración. Fuente: (Muñoz, 2005)	8
Tabla 3. Características de la cuenca. Fuente: ICE 2008.	15
Tabla 4. Caudales estimados por estudio del trasvase. Fuente: ICE, 2008.	15
Tabla 5. Caudales esperados para distintos periodos de retorno. Fuente: Hernández et al, 2002.	16
Tabla 6. Descripción de las imágenes obtenidas para la base de Datos.	23
Tabla 7. Clasificación de Grupo Hidrológico. Fuente: Manual de Suelos MAG.	25
Tabla 8. Grupo Hidrológico según tipo de infiltración. Fuente: (Muñoz, 2005).	25
Tabla 9. Referencia para la clasificación supervisada de las imágenes satelitales.	26
Tabla 10. Descripción de reportajes en la zona.	33
Tabla 11. Matriz de confusión para clasificación supervisada, Imagen Lansat 2012.	46
Tabla 12. Matriz de confusión para clasificación no supervisada, Imagen Lansat 2012.	47
Tabla 13. Tipos de uso de suelo mediante método supervisado.	48
Tabla 14. Tipos de uso de suelo mediante método no supervisado.	49
Tabla 15. Porcentaje de la tasa de cambio.	49

Tabla 16. Fotografías área de estudio, 21 de noviembre de 2013.	51
Tabla 17. Porcentaje de cobertura del suelo, año 2001.	55
Tabla 18. Porcentaje de cobertura permeable y no permeable del suelo, año 2001.	55
Tabla 19. Porcentaje de cambio de cobertura del suelo, año 2008.	59
Tabla 20. Porcentaje de área impermeable del suelo, año 2008.	59
Tabla 21. Área de cobertura del suelo, año 2012.	63
Tabla 22. Área impermeable del suelo, año 2012.	63
Tabla 23. Cobertura de suelo urbano e industrial esperada para el año 2020.	67
Tabla 24. Evaluación de la cobertura futura para conocer si sobrepasa área de aporte del cantón.	67
Tabla 25. Área impermeable del escenario 2 por cantón.	70
Tabla 26. Cobertura de uso de suelo escenario 2 adecuada a clasificación propuesta.	70
Tabla 27. Características de las subcuencas modeladas	74
Tabla 28. Número de Curva. Fuente: Muñoz 2005	76
Tabla 29. Número de curva para cada subcuenca.	76
Tabla 30. Estaciones Metrológicas del IMN.	79
Tabla 31. Láminas máximas de lluvia anuales para duraciones de 1 hora.	81
Tabla 32. Lámina de Precipitación para la estación Juan Santamaría.	85
Tabla 33. Lámina de Precipitación para la estación San José.	85
Tabla 34. Lámina de Precipitación para la estación Santa Bárbara.	86
Tabla 35. Láminas seleccionadas para el modelo hidrológico.	87
Tabla 36. Intensidades de lluvia para distintos periodos de retorno, mediante Gumbel.	88
Tabla 37. Resumen de los tiempos de concentración (min)	91
Tabla 38. Características de los tramos.	91
Tabla 39. Caudales de salida de Quebrada Seca y río Bermudez.	100
Tabla 40. Porcentajes de aumento entre años y entre escenarios.	101
Tabla 41. Aumento de caudal cambiando uso de suelo del escenario 1 en Heredia.	101

Resumen

La expansión de la cobertura urbana e industrial en la cuenca generada por los ríos Quebrada Seca y Bermúdez ha causado un incremento en la severidad de las inundaciones, dañando infraestructura de la provincia de Heredia. Realizando una investigación de los esfuerzos realizados por los gobiernos locales se descubre que requieren de una precisa descripción de estas lluvias y los caudales que estos generan, tanto a nivel de cuenca como de distrito. Este estudio cuantificará la descarga en diversos puntos de la cuenca, basado en tormentas de 3 duraciones distintas. Serán analizados 5 escenarios de los cuales 3 escenarios son de años anteriores (2001, 2008 y 2012) y 2 escenarios diferentes del 2020, uno basado en plan regulador y otro en el crecimiento urbano. Las variaciones en los cambios de cobertura fueron determinadas con imágenes Lansat 7 ETM+. Una clasificación supervisada y no supervisada fue aplicada a las imágenes y 6 clases comunes fueron obtenidas: bosque, cultivo, pasto, urbano, suelo descubierto e industrial. El número de curva fue asignado basado en esta información y un modelo de elevación digital (MED) de 30 metros de resolución fue usado para calcular los parámetros de la cuenca. La información de lluvia de tres estaciones fue analizada para obtener los periodos de retorno (2, 5, 10 y 25 años). Los cambios en el caudal generado por los escenarios fueron calculados con el programa HEC-HMS. Una validación del modelo fue realizada mediante un registro de altura máxima del agua y el evento de lluvia del 1 octubre del 2004. El análisis de las imágenes satelitales muestra un crecimiento de cobertura impermeable de 27% para el escenario 1 y 19% para el escenario 2, con aumentos de caudales a partir de un 13% hasta un 28% para escenario 1 comparado con el año 2012, esto dependiendo de la tormenta. Para el escenario 2, no se esperan ningún cambio. Estos hallazgos podrán ayudar a aumentar la concientización en los gobiernos locales del peligro de la alta ocurrencia de los eventos de inundación, de esta manera, enfocar sus esfuerzos y los recursos económicos a una solución integral.

Palabras clave:

Cambios de uso del suelo, impermeabilización en los suelos, sistemas de información geográfica, imágenes satelitales Lansat, cuencas urbanas.

Capítulo 1. Introducción

La cuenca hidrográfica se define como un área geográfica drenada por un río. Esta área posee límites naturales, donde, al caer la precipitación, las aguas superficiales y subterráneas son conducidas hacia una red natural que confluye en un cauce común. El río es solamente un elemento de la cuenca, pero es el elemento más importante de la misma, ya que es el elemento integrador, el que produce la conexión: aguas arriba y aguas abajo (Riviera, 2002). En otras palabras, a través del río ocurre el efecto de que lo que hagamos aguas arriba tenga repercusión aguas abajo.

El manejo de cuencas urbanas y las inundaciones provocadas por sus ríos presentan diferencias con respecto a las cuencas naturales, y sus medidas de mitigación claramente diferentes a las que se pueden emplear en zonas naturales. Además, según Zevenbergen (2010), debido a la misma característica urbana, es decir, a la población existente, se crea un crecimiento exponencial en el número de eventos de inundación. Subsecuentemente, la gravedad en términos humanos y económicos de estos eventos aumenta conforme los eventos ocurren.

Zevenbergen (2010) recomienda soluciones no estructurales y adecuación de las personas ante la sucesión de los eventos de inundación; explica que no existe una única estrategia de contención para las inundaciones, sino que se deben realizar una serie de medidas tanto sociales como económicas que se adecuen a la ciudad o región. Tal es el caso de los “anillos verdes”, zonas alrededor del margen del río que sirven como zonas recreacionales; suelos permeables, entre otras soluciones que han resultado muy exitosas en Estados Unidos y Europa.

El efecto antrópico, como cambios espaciales en el tiempo, principalmente impermeabilización de los suelos, incrementa la repuesta de los ríos ante precipitaciones extremas. A esta tendencia también hay que añadirle los efectos provocados por el cambio climático. El cambio de uso de suelo debe ser calculado y analizado desde el punto de vista hidrológico y los efectos que generan aguas abajo para que los municipios o gobiernos locales puedan realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos cuando se organicen para resolver la problemática.

La modelación hidrológica permite recrear la realidad de la cuenca una vez el modelo se encuentre calibrado, generando datos confiables de los caudales que se producen en la cuenca. He inclusive, los gobiernos locales pueden tener una herramienta que permita evaluar la tendencia de cambio de uso en el futuro, creando soluciones cuando se abran los

espacios de dialogo para la toma de decisiones para una adecuada gestión de los recursos hídricos, tanto a nivel de cuenca como a nivel de gobierno local.

Por tanto, la Gestión de Recursos Hídricos plantea una integración de todos los actores presentes en una cuenca hidrográfica para su debida protección. Hace hincapié en que el plan hidrológico para la cuenca debe contemplar la dinámica de una cuenca y el ordenamiento territorial que los actores involucrados establecen en ella.

Así pues, el ordenamiento territorial es la medida en la que un país establece lineamientos para regular el uso del territorio. Mediante el cual se determinan los lugares aptos para las diferentes actividades humanas, la producción agrícola y la protección de la naturaleza. Gracias a su ejercicio los conflictos territoriales pueden ser resueltos y el crecimiento urbanístico puede ser desarrollado de manera sostenible con el medio ambiente (Astorga, 2010).

En Costa Rica se ha realizado un gran esfuerzo para llevar el concepto de ordenamiento territorial a la práctica, entre esos esfuerzos tenemos la delimitación de la Gran Área Metropolitana (GAM) en 1982, límite territorial que abarca los poblados más desarrollados del país. Al establecer esta delimitación, se tenía como objetivo el crear políticas, lineamientos, leyes y servicios públicos dentro de sus límites para realizar un correcto ordenamiento territorial (MIVAH, 2013).

No obstante, varias iniciativas no han cumplido a cabalidad sus objetivos, sino que se han encontrado serias deficiencias en sus planteamientos. Por otro lado, muchas de estas iniciativas no han tenido apoyo gubernamental y/o municipal, provocando su desecho. Como ejemplo, unas iniciativas no implementadas están en el Plan Regional Urbano para la Gran Área Metropolitana (PRUGAM) planteadas en 2008, proyecto con una gran investigación de referencia, validado por profesionales y aprobado por varias instituciones públicas. Dicho plan no fue bien recibido, debido a que requería comprometer el desarrollo urbano a una sola zona, detener la expansión residencial, proteger las zonas de potencial agropecuario, las zonas de recarga hídrica y zonas para la conservación ambiental (PRUGAM, 2007).

Entre los proyectos que han dado buenos resultados se encuentra el trabajo del Programa de Regularización de Catastro y Registro, iniciativa que ofrece herramientas a los municipios para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y fortalecimiento en materia de recaudación de impuestos.

Es importante recalcar que los planes mencionados anteriormente fueron posibles gracias a la utilización de Sistemas de Información Geográfica, herramientas informáticas que permiten almacenar grandes cantidades de datos, organizarlos, editarlos y presentar mapas o Tablas que faciliten la interpretación de la realidad, de esta manera se puedan identificar conflictos, plantear soluciones y validar la toma de decisiones (Willems, 2012).

La cuenca de los ríos Quebrada Seca y Bermúdez abarca los cantones de Heredia, Barva, Flores, San Rafael, San Pablo, Belén, parte de Santo Domingo y San Isidro; en ella, se han suscitado varios problemas de inundación desde principios del año 2000 hasta el presente. Durante 10 años pasó de ser problema menor a un desastre que provocaba daño en los pobladores, destrozos de viviendas, deterioro de puentes, daños en las vías de transporte. Se ha señalado que esto es debido a creciente desarrollo urbanístico de la zona, mal planteamiento de ordenamiento territorial, entre otros factores.

El cantón de Belén ha alcanzado un desarrollo que lo ubica entre los mejores 5 cantones en cuanto a eficiencia administrativa según el Estado de la Nación en el 2010. Gracias a su desarrollo ha logrado implementar medidas de ordenamiento territorial mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográfica, los cuales han generado mapas que ayudan al entendimiento de la problemática y logran ser una herramienta para la toma de decisiones. Este desarrollo ha sido logrado a pesar de las múltiples dificultades que ha presentado el cantón, debido al desbordamiento de los ríos, situación que los ha venido afectando desde hace varios años según reportes de los medios de comunicación.

1.1 Antecedentes

La problemática de inundación en Quebrada Seca inició cuando diferentes alcantarillas en los poblados de la cuenca colapsaron durante el invierno de 1999, según reportaje de la Nación (Solano, 1999). Desde esos años se están presentado sucesos de la misma índole, desbordamiento del río (Angulo, 2006), arrastre de materiales (Ross, 2012), entre otros. Podemos observar fotos tomadas de los reportajes efectuados en las Figura 1; las cuales muestran la magnitud del daño que el río Quebrada Seca puede hacer a la comunidad.

Estudios anteriores en la zona determinaron caudales de diseño para dar un punto de partida para construir obras civiles, recalcaron las problemáticas de la expansión urbana (Marín, 1991). En otros estudios, se propuso un modelo hidrológico del área en cuestión mediante el programa HEC-1 (Calderón, 1999), sin embargo, este se realizó con información limitada. Un modelo hidráulico se desarrolló con el programa HEC-RAS, con

el cual se realizó un levantamiento topográfico y una calibración del modelo5 de un evento de 25 años de periodo de retorno (Serrano, 2004).



Figura 1. Fotografías de una de las 270 casas afectadas por inundaciones y arrastre de materiales en las cercanías de proyecto Gol, Belén, 2012. Fuente: La Nación, 2007 y La Nación 2012.

Dentro de la provincia, la Universidad Nacional (UNA) ha realizado monitoreo, estudios e investigaciones de esta y otras cuencas de Heredia, mediante diversos cursos de carrera de la UNA y programas de investigación. Además, debido a la importancia socioeconómica de la zona, distintas instituciones públicas como el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), el Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA), la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) y La Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) han realizado estudios de la cuenca, de la disponibilidad del recurso y su vulnerabilidad.

1.2 Justificación.

Las inundaciones que se han suscitado en la cuenca han causado daños materiales, gasto económico y disgusto por parte de la comunidad, lo cual ha generado preocupación en la población en general. Se tiene la noción, por parte de la municipalidad de Belén, que es un problema por el uso inadecuado de tierras en la parte alta de la cuenca. Este uso inadecuado produce una impermeabilización del suelo y, por tanto, un mayor escurrimiento de las aguas a las partes bajas de la cuenca.

Con el presente trabajo se implementará un modelo hidrológico que determine, compare y dé a conocer los caudales que están llegando a la parte baja de la cuenca, debido al cambio de uso de suelo permeable a impermeable en un ámbito de 20 años. También, el trabajo

busca analizar el porcentaje de caudal debido al fenómeno espacio temporal de la impermeabilización que aporta cada cantón a la cuenca, que puedan provocar inundaciones futuras a las zonas más vulnerables de la cuenca.

De esta manera, se pueden proponer medidas de mitigación, pero, más que nada, concientizar a la población y a los gobiernos locales para que interioricen que es un problema intercantonal y que su solución preventiva o correctiva debe de ser implementada bajo un plan de trabajo en conjunto.

Esta investigación logra generar una herramienta que puede ayudar a facilitar la toma de decisiones y a promover una mayor integración de la administración en el manejo de cuencas, tanto aguas arriba como aguas abajo. Así, al identificar las causas de los desbordamientos de los ríos, se pueden dar recomendaciones y realizar modelos de pronóstico de futuros escenarios de inundaciones. De esta manera, la población pueda estar informada de zonas de peligro y el gobierno local pueda enfocar sus esfuerzos en la mitigación y prevención de desastres.

1.3 Objetivo general

Analizar los efectos del cambio de uso de suelo en las cuencas Quebrada Seca y río Bermúdez, mediante la utilización de sensores remotos, sistemas de información geográfica y modelación hidrológica en un período de 20 años y dos escenarios de crecimiento impermeable, uno a 10 años en el futuro basado en la tendencia de crecimiento de años anteriores y otro según normas gubernamentales.

1.4 Objetivos específicos:

- I. Investigar los esfuerzos realizados por las municipalidades en la zona de estudio con relación al problema de inundación provocado por la cuenca de río Quebrada Seca y Bermúdez.
- II. Determinar los cambios en el uso de suelo en Quebrada Seca y río Bermúdez mediante interpretación de imágenes satelitales en los años 2001, 2008 y 2012.
- III. Analizar el impacto de cambio de uso del terreno en los caudales picos y volúmenes de escorrentía resultantes del programa de modelación hidrológica para los años 2001, 2008, 2012 y la proyección del 2020 con dos escenarios: mediante la tendencia de crecimiento urbano y la determinada por los planes reguladores.

Capítulo 2. Marco teórico

Como primer parámetro a analizar para la modelación es la precipitación que cae, ya que con esta se procede a obtener el periodo de retorno, tiempo de ocurrencia en que pueda caer una tormenta de cierta magnitud

Para realizar o encontrar este tiempo de retorno, se recurre a modelos de distribución. Estos podrán predecir la frecuencia de las precipitaciones. Existen diversas distribuciones teóricas comúnmente utilizadas en hidrología, entre ellas (Villón, 2012)

- Distribución Normal
- Distribución Log Pearson
- Distribución Gumbel
- Distribución Gamma de 2 parámetros

Una vez determinado la distribución de mejor ajuste, se procede a determinar las láminas de agua a distintos periodos de retorno. De igual manera ya teniendo estas láminas es recomendable determinar las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para conocer o elegir tormentas de diseño.

El siguiente parámetro es el tiempo de concentración, este es el tiempo transcurrido que le toma a una gota de agua, que cae en el punto más alejado de la cuenca, llegar a la salida de esta. El tiempo es determinado por las características geográficas, como la rugosidad, y topográficas, como la pendiente de la cuenca.

Existen dos metodologías para el cálculo del tiempo de concentración: el directo, mediante trazadores o instrumentos de medición; la otra forma, mediante estimados, utilizando ecuaciones empíricas (Villón, 2004).

Muchas de estas ecuaciones se obtuvieron de cuencas experimentales en los Estados Unidos, cada una con parámetros diferentes que se adecuan a distintos tipos de cuencas, a como se observa en la Tabla 1. Cabe destacar que existen pocas ecuaciones aplicables a cuencas urbanas y algunas tienden a sobrestimar valores cuando se aplican a este tipo de cuencas.

Tabla 1. Ecuaciones tiempo de concentración. Fuente: Sol Conservación Service, traducido por (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú., s.f.)

MÉTODO Y FECHA	FÓRMULA PARA t_c (minutos)	OBSERVACIONES
<p>Kirpich (1940)</p>	$t_c = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385}$ <p>L = longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m. S = pendiente promedio de la cuenca, m/m</p>	<p>Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%); para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.</p>
<p>Federal Aviation Administration (1970)</p>	$t_c = 0.7035 * \left[\frac{1.1 - C}{S^{0.333}} \right] * L^{0.5}$ <p>C = coeficiente de escorrentía del método racional. L = longitud del flujo superficial, m. S = pendiente de la superficie, m/m</p>	<p>Desarrollada de información sobre el drenaje de aeropuertos recopilada por el Corps of Engineers: el método tiene como finalidad el ser usado en problemas de drenaje de aeropuertos pero ha sido frecuentemente usado para flujo superficial en cuencas urbanas.</p>
<p>Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley (1965) Aron y Erborge (1973)</p>	$t_c = 7 * \left[\frac{n^{0.6} * L^{0.6}}{I^{0.4} * S^{0.3}} \right]$ <p>L = longitud del flujo superficial, m. n = coeficiente de rugosidad de Manning. I = intensidad de lluvia, mm/h. S = pendiente promedio del terreno- m/m.</p>	<p>Ecuación para flujo superficial desarrollada a partir de análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial desde superficies desarrolladas; el método requiere iteraciones debido a que tanto I (Intensidad de lluvia) como t_c son desconocidos, la superposición de una curva de intensidad – duración – frecuencia da una solución gráfica directa para t_c.</p>
<p>Ecuación de retardo SCS (1973)</p>	$t_c = 0.0136 * \frac{L^{0.8}}{S^{0.5}} * \left[\frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0.7}$ <p>L = longitud hidráulica de la cuenca o mayor trayectoria de flujo, m. CN = Número de curva SCS S = pendiente promedio de la cuenca, m/m.</p>	<p>Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800 Ha; se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación; se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies; la ecuación supone que $t_c = 1.67$ x retardo de la cuenca.</p>

Otra metodología empleada es la construcción de líneas de drenaje, llamadas isócronas, semejantes a las curvas de nivel. Estas líneas indican la velocidad de la gota en distintos puntos de la cuenca. Para obtener el tiempo más largo que una gota recorre en los diferentes puntos de las cuencas, se determina el tiempo de concentración en 3 diferentes tipos de flujo.

La ventaja de esta metodología es que, con la última ecuación se puede dividir el río en varios tramos, de esta manera, en cada tramo se obtiene una velocidad, y se interpolan estos puntos de drenaje, lo que permite obtener las isócronas de la cuenca (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones para tiempo de concentración. Fuente: (Muñoz, 2005)

Nombre y descripción	Ecuación
<p>Flujo superficial en lámina. Siendo T_c en horas, largo (L) en metros y la pendiente (J) en metros sobre metros. n es la de manning, P_2 es la profundidad lluvia (mm) de la tormenta de 2 años con periodo de 24 horas.</p>	$T_c (hr) = 0.09126 * (n * L)^{0.8} * P_2^{-0.5} * J^{-0.4};$ $L \leq 90 m$
<p>Flujo superficial concentrado poco profundo. L va de los 90 m hasta contacto con el cauce del río.</p>	$T_c (hr) = \frac{L}{3600 * v}; v = a * \sqrt{J};$ $a = 6.20 \frac{m}{s} \text{ si es suelo pavimentado,}$ $\text{sino } a = 4.92 \frac{m}{s}$
<p>Flujo superficial concentrado en canales abiertos. Se aplica las ecuaciones de canal abierto, L es el largo del río, n es de manning, R es radio hidráulico y J diferencia de alturas del tramo de río que se escoge en m/m.</p>	$T_c = \frac{L}{v}; v = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{n} * \sqrt{J}$

Debido a la incertidumbre sobre cuál ecuación sería la más adecuada para una cuenca urbana, algunos estudios han sido conducidos. Uno de estos estudios reveló que la mediana de varias ecuaciones enseña a la ecuación que mejor se ajusta a las condiciones de la cuenca urbana. En su estudio, Vélvez (2011) utilizó la Quebrada San Luis, en Manizales, Colombia. En dicha cuenca se tienen 4 estaciones pluviográficas y un aforo, de esta manera

podría comparar datos reales con experimentales para determinar la ecuación que se aproxime mejor a las condiciones reales. Las ecuaciones como la Sol Conservation Service o la Federation Aviation Agency revelaron una mejor confiabilidad al incluir cobertura en sus parámetros, mostrando que la cobertura urbana, en efecto, genera tiempos de respuesta altos, cercanos al real y, por lo tanto, coherentes con una cobertura urbana, no obstante, consideran a la mediana de varias ecuaciones la mejor aproximación a las condiciones reales.

Otro parámetro que se requiere en la modelaciones realizar un tránsito de avenidas en tramos del río, esto para calcular de forma correcta el caudal de salida. Existen varias metodologías para realizar este cálculo. Entre ellas (Villón, 2012):

- Muskingum
- SCS
- Muskingum – Cunge.
- Onda Cinemática

Las variables de entrada del método de Muskingum son K y X. Se basan en mediciones de hidrogramas realizados en el cauce. En el método del SCS sólo se especifica un tiempo de retraso de la onda en la entrada y salida del tramo del cauce. Tanto el método de la Onda Cinemática como el método de Muskingum – Cunge requieren datos de la geometría del canal principal, el coeficiente de rugosidad del cauce, la pendiente del canal y la longitud del tramo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú., s.f.).

2.1 Sistemas de información geográfica para análisis de cuencas

La utilización de sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes satelitales han probado ser una herramienta que permiten realizar modelos para representar, de manera precisa, la hidrología en cuencas urbanas. Tal es el caso de Campos et al., 2012, que realizó un estudio del riesgo de la impermeabilización en una cuenca urbana localizada en Valencia, España. En ella destaca la importancia de realizar una actualización de la caracterización del territorio mediante imágenes satelitales LiDAR, considerando los nuevos desarrollos urbanos aprobados por la municipalidad, para proponer adecuadas soluciones a las inundaciones. El estudio evaluó la peligrosidad debido a la escorrentía y desbordamiento de los causes. Se aplicó un modelo bidimensional GUAD 2D con cartografía del satélite LiDAR (celdas 1 m). Mediante el modelo se determinó los caudales que provocan inundaciones y su velocidad de avance. Además, Campos complementa su estudio mediante datos de precipitaciones con diferentes periodos de retorno, una capa de uso de suelos hidrogramas generados por modelo HEC HMS. En conclusión, los resultados obtenidos son mapas de inundación de la zona, mapas de velocidades de desagüe mediante

el modelo hidráulico; mapas que fueron generados para la visualización de las zonas de más peligro y que necesiten construcción de medidas estructurales.

Otro estudio importante fue el propuesto por Ávila et al., 2012, donde se analizó una medida de bajo impacto (conocido en inglés como “Low Impact Development, LID”) para la disminución del volumen de escorrentía en cuencas urbanas. La medida analizada fue la utilización de tanques subterráneos para almacenamiento temporal de agua, medida exitosa entre otras, debido a que requerían de poco espacio (5 y 20 m³).

Los trabajos de investigación, que utilizan la modelación hidrológica, comúnmente realizan un análisis comparativo, que da a conocer los caudales que están llegando a la parte baja de la cuenca. Así pues se puede dar a conocer: el porcentaje de caudal que se aporta a la cuenca, los eventos de lluvia que puedan provocar inundaciones futuras y las zonas más vulnerables debido a estos eventos.

Por último, para la modelación hidrológica, y en especial con el modelo HEC-HMS, es importante tener cuidado en la selección del valor de parámetro de número de curva parámetro que requiere de características de uso de suelo, potencial de infiltración y condición del suelo (Villón, 2004).

2.2 Clasificación de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales de Landsat provenientes de la base de datos del “United States Geological Survey” cuentan con 8 bandas multispectrales con una resolución de 30 x 30 metros, es decir, cada pixel de la imagen corresponde a un cuadrado de 90 metros cuadrados.

Además, las imágenes Landsat 7 ETM+ tienen 8 bandas asociadas a ellas, banda 1 corresponde a colores azules (longitud de onda de 0.45 a 0.515 μm), banda 2 a colores verdes (0.525 a 0.605 μm), banda 3 a colores rojos (0.630 a 0.690 μm), banda 4 a infrarrojo cercano (0.775 a 0.900 μm), banda 5 a infrarrojo medio (1.55 a 1.75 μm), banda 6 a infrarrojo onda corta (1.75 a 2.09 μm), banda 7 a infrarrojo onda corta (2.09 a 2.35 μm) y la banda 8 a pancromática (0.520 a 0.900 μm).

Para comprender mejor qué es una banda en una imagen satelital, podemos definirla como una composición de colores de un espectro emitido por la radiación solar. Las distintas combinaciones de bandas pueden generar distintos colores a las imágenes para obtener composiciones como color verdadero, color falso, infra rojo cercano o medio. Así pues, de

estas composiciones se pueden realizar análisis importantes como índices de vegetación o usos de suelo. En el caso de usos de suelos, se puede realizar una clasificación de imágenes satélites para obtener mapas temáticos de uso de suelo con la respectiva tabla de atributos.

La imagen multibanda se convierte en una imagen del mismo tamaño, con la diferencia de que los píxeles no están asignados a la radiación detectada, sino a una categoría definida por el usuario, que busca una clasificación relativa, válida para la imagen. Las variables deben ser utilizadas mediante métodos de clasificación para lograr una adecuada obtención de información. Existen dos métodos de clasificación: la supervisada y no supervisada. La clasificación supervisada parte de haber conocido de antemano la zona de estudio, del cual se conoce los puntos clave en la zona para cada una de las categorías a ser realizadas; el no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos en las clases de espectros para generar las categorías. (Velásquez M., 2011).

Dicho de otro modo, la clasificación supervisada requiere de firmas espectrales definidas por el usuario, basado en el conocimiento de la cuenca para así agrupar a los píxeles a la característica del suelo. La no supervisada agrupa píxeles de forma automática mediante la afinidad de los píxeles, la cantidad de clases es definida por el usuario.

Así pues, mediante estas clasificaciones, es posible obtener un adecuado mapeo del uso de suelo usando imágenes del satélite Landsat para estudios de impermeabilización, con una exactitud razonable, sin costo, sin embargo, la resolución limita la eficiencia del estudio, por lo que para grandes extensiones sí se obtienen valores más acordes a la realidad (Dams et al., 2013).

En relación a la impermeabilización del suelo, se puede mencionar la investigación de Dams et al (2013), utilizando imágenes Landsat determina el impacto de urbanizaciones en 17 años en la escorrentía. Establece que la mejor forma para separar clases similares como suelo desnudo e urbano es mediante las técnicas de clasificación tipo suave, donde con un 1 % de probabilidad de ser urbano son clasificados como urbano, mediante este método de clasificación suave es posible lograr diferenciación de clases.

Otros estudios, como el de Segl y Kaufmann citado por Zhang (2011), destacan que, para lograr una buena clasificación, esta debe ser acompañada de comprobación visual humana, ya que cuando la composición de objetos en el suelo es más grande que la resolución de la imagen se puede observar texturas diferentes. Por consiguiente, la clasificación de suelos mediante imágenes satelitales con comprobación de campo es más exacto, pero menos eficiente, tanto siendo supervisado como no supervisado.

La necesidad de comprobación se debe a la confusión de espectros causada por los objetos presentes. Además, para lograr una mejor eficiencia mediante imágenes satelitales utilizaron en su estudio imágenes de resolución de 2.3 metros con cuatro bandas; azul, verde, rojo e infrarrojo cercano y, con una imagen panchrométrica de 0.6, al unir las lograron una imagen con mejoría en las características espectrales de contenido geométrico y en información de textura. De esta manera, se obtiene información comprensiva para el análisis, objetos con características semejantes lograron ser diferenciados; como edificios, caminos, carreteras, bosque, cultivo y cuerpos de agua. También, Zhang & Zhu (2011) establecieron lineamientos para hacer diferencia entre clases como bosque y cultivo en los que hay que utilizar el infrarrojo cercano, ya que el cultivo en esta banda tiene un valor espectral más alto o cuerpos de agua que provoca que la reflectancia sea absorbida. Por último, mencionan que, la clasificación del espectro de edificios y calles no puede ser diferenciada por métodos simples, ya que estos están compuestos por materiales semejantes.

Para lograr una mejor clasificación para clase de cobertura vegetal como bosque y cultivo es recomendable usar las técnicas de infrarrojo termal de los sensores remotos. Muchos de los estudios se han enfocado en analizar la temperatura de la superficie del suelo para asignar patrones de cobertura mediante el infrarrojo termal del satélite Landsat (Weng, 2012). Complementando lo anterior, para realizar una adecuada clasificación, se debe de realizar una comprobación de campo, pero algunas veces no es posible cuando se realizan estudios temporales o en zonas de difícil acceso (Velásquez M., 2011).

No obstante, existen otras metodologías para corroborar la adecuada asignación de pixel a una clase de uso de suelo. Una de ellas es la matriz de confusión; una tabla que permite comparar que tan bien la clasificación asignó la categoría con la realidad (Visa, Ramsay, & Knaap).

En resumen, este método nos permite conocer si un pixel fue asignado erróneamente a una clasificación a la que no pertenece. Se aplica tanto a una clasificación supervisada como no supervisada, aunque en la no supervisada se llama matriz de correspondencia. En las filas se ubica la clasificación real y en las columnas se coloca las clases asignadas.

Es importante mencionar a la constante kappa obtenida de una ecuación matemática de la matriz de confusión, ella es el valor más representativo de esta tabla. Es el índice de acuerdo entre la imagen de referencia y la de la clasificación realizada que varía de 1 a 0, siendo 1 ajuste a 100% y 0 ajuste a 0%. Por ejemplo, estudios de cambios de usos de

suelos van acompañados con la utilización de la matriz de confusión, ya que permite descubrir si se debe de volver a realizar una clasificación o no.

Cabe destacar la investigación realizada por Sexton et al. (2013), en ella se compara cambios en 10 clases durante 21 años, donde muestra, en una primera clasificación, un kappa de 0.7, y al ajustarlo se logró obtener un kappa de 0.84 de acuerdo de los datos asignados con los reales. Gracias a esto, se logró validar mejor los resultados, que muestran cambios significativos en las clases. (Sexton, et al, 2013).

2.3 Modelación hidrológica

La modelación es el proceso por el cual se puede representar un fenómeno o comportamiento a suceder en la naturaleza. Permite simular eventos naturales que sucedieron en algún momento y pronosticar situaciones que puedan ocurrir con una alta probabilidad de ocurrencia. Su importancia yace en la utilización para el diseño de obras de infraestructura. Por consiguiente, se puede simular la respuesta que tendrá la cuenca de un río en su escurrimiento superficie del producto de una precipitación. Para esto, se requiere de datos de lluvia, tipos de suelo, cobertura del suelo, mapa de pendientes, delimitación de ríos entre otros (Villón, 2004).

En conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramientas para gestión de datos, de los cuales se puede obtener información de la realidad, la modelación hidrológica puede lograr recrear condiciones que pueden presentarse ante un evento de lluvia. En consecuencia, los estudios efectuados en esta rama han sido varios.

Por ejemplo, en estudios como el de Wijesekara et al., 2011, realizó un modelo hidrológico en el río Elbow, en Canadá, para generar un modelo hidrológico con base en un cambio de uso de suelo en 20 años. Así pues, mediante el modelo de cambio de uso de los suelo de los años 1985 a 2001, validado con mapas 2006 a 2010, se pronosticó para 2031. De esta serie de datos se extrajeron parámetros para insertarlos en el modelo hidrológico.

Otra mención importante es que hubo incremento en construcciones, parqueo, 1 %, y reducción de 34 % en bosque, lo que provoca un potencial negativo en la sostenibilidad del agua en el suelo/superficie y en el agua subterránea a futuro. Además del análisis de riesgo a inundaciones, se determinó un estudio de pronóstico para un cambio de uso de suelo progresivo. Se logró analizar el incremento del proceso hidrológico en la cuenca a través de los años. Concluyeron que la impermeabilidad provocada por el cambio de uso de suelo retiene la infiltración de agua e incrementa los caudales (Wijesekara et al., 2011) .

Complementando esta línea de estudios hidrológicos para las áreas periurbanas afectadas por la hidrología de los ríos, Jacqueminet et al (2013) propone una metodología de unión de un mapa aéreo catastral de la zona con un mapa satelital. Mediante la unión de ellos se puede obtener un mapa con mayor exactitud al tener tantas varias resoluciones espectrales como visuales. Aunque una imagen aérea presenta mayor resolución, esta carece de baja resolución espectral, que la imagen satelital tiene. Lo anterior afecta la utilización de métodos automáticos para la generación de clasificaciones. Se insta a que la resolución de los mapas generados debe de ser acorde al modelo hidrológico.

Otros estudios a mencionar en el área de la impermeabilidad en cuencas urbanas serían los de Van De Voorde et al., 2011. En su estudio se obtuvo un mapa de impermeabilidad para la resolución de imágenes de 1988 y 2001; obtienen datos relevantes de morfología mediante una clasificación supervisada. Afirman que se puede obtener una exactitud de 86% para discernir entre clases de residencial y comercio. Concluyen que no existe conexión directa entre espectro reflectante y el uso de suelo funcional.

2.4 Investigaciones realizadas en la zona de estudio

En cuanto a investigaciones dentro de la cuenca, está la realizada por Laura Segura (2004). Por medio de Hec-Ras, se determinó las planicies de inundación de la cuenca. Tiempo después, se realizó un estudio para la creación de un trasvase efectuado por el Instituto Costarricense de Electricidad (2008); como estudio más actual, está el trabajo de Masis y Vargas (2011) donde se analizaron de los cambios del uso de la tierra en 1960, 1990, 2010 y su efecto en el comportamiento hidrológico. Observaron cómo en 1960 la cobertura imperante era el cultivo de café, pero en 1990 se observa que la cobertura urbana va quitándole terreno a la del café y pasto para que, en el 2010, del total de cobertura en la cuenca, la mayoría tenga cobertura urbana. Concluyen que de los escenarios de impermeabilización se tiene en 1960 (9,5%), 1990 (32%) y 2010 (51%) del total del área de la cuenca. Recalcan la importancia de detener las espontaneas urbanizaciones en la zona, que colaboran al aumento de crecidas y sus subsecuentes inundaciones. Además realizaron un análisis de vulnerabilidad en la zona donde determinan zonas donde es hay mayor riesgo al desbordamiento por las márgenes del río como la Asunción, San Antonio, barrio el Futuro y la Amistad.

Como estudios hidrológicos realizados en la microcuenca por parte de la municipalidad de Belén, es de suma importancia el conocimiento del estudio para la construcción de un trasvase en Belén. Dicho estudio fue adjudicado por contrato al Instituto Costarricense de

Energía (ICE, 2007). El objetivo de dicho estudio era ver la factibilidad de la construcción de estructuras para trasladar el excedente de lluvias. Contaron con información topográfica proporcionada por la municipalidad, datos meteorológicos de la zona proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional, modelaciones realizadas en la zona por Laura Segura (2004) y Marco Hernández (2002). Realizaron una recopilación de estudios, caracterización de la cuenca, estudio hidrológico donde definieron los caudales asociados a eventos de precipitación y la propuesta de la desviación de las aguas de los ríos Quebrada Seca y Burío hacia el Virilla mediante la construcción del trasvase. Un resumen de los caudales y datos relevantes se pueden observar en la Tabla 3 y la Tabla 4.

Tabla 3. Características de la cuenca. Fuente: ICE 2008

Parámetro	Quebrada Seca	Río Bermúdez
Área(km2)	19.9	49.6
Pendiente media	0.054	0.054
Porcentaje impermeable	45%	31%
Tc(tiempo de concentración)min	68	85

Tabla 4. Caudales estimados por estudio del trasvase. Fuente: ICE, 2008

Tiempo de retorno (años)	Quebrada Seca (m³/s)	Río Bermúdez (m³/s)
1	60.2	113.1
5	127	254
10	144	291
25	157	338
50	183	373
100	200	412

La modelación hidrológica realizada comenzó con la delimitación de la cuenca, de acuerdo al tipo de cobertura del área. Seguidamente, realizaron una clasificación no supervisada de imágenes satelitales para obtener un mapa de uso de suelos de las subcuenca. Luego, la generación de hidrogramas mediante la información meteorológica. De esta manera, se obtuvo las avenidas para distintos periodos de retorno (ICE, 2007).

Otro estudio relacionado es la investigación hidráulica realizada por Laura Segura, utilizado como referencia para aplicación de obras en la municipalidad de Belén. En dicho estudio, se tomaron 131 secciones transversales de una distancia de 4,8 km, basados en las visitas de campo. Se asignó n de Manning (para márgenes del río de 0.1 y para el cauce de 0.045), se incluyó la información de 13 puentes, se utilizaron los caudales generados por Hernández en el 2002. Utilizó un régimen mixto, condiciones de frontera iguales para aguas arriba y aguas debajo de profundidad normal. El modelo logró ser calibrado gracias a las mediciones de un evento que sucedió el 1 de octubre de 2004. Los resultados se pueden observar en la Tabla 5 presentada a continuación.

Tabla 5. Caudales esperados para distintos periodos de retorno. Fuente: Hernández et al, 2002

Concepto	Datos			
T(años)	2	10	25	50
Q pico (m ³ /s)	62.06	98.28	116.76	128.6

Se concluyó que, utilizando un caudal de periodo de retorno de 2 años, ya se presentaban 18 secciones críticas en la cuenca; para un periodo de 50 años, se presenta 67 secciones críticas; además, en ciertos puentes, para un caudal de 120 (m³/s), el puente actúa como vertedor tipo orificio para el flujo de agua.

Otro importante estudio a descartar es el realizado por El Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDus), a cargo del Ing. Luis Fernando Zamora, el cual efectuó el diagnóstico para el plan regulador de 2013. En dicho estudio se identificó que el uso principal de suelo es el urbano (con un casi 58.2 %, pastos con 11.1%) (Marcelino & Luis, 2013). El problema que señalan de esta cobertura de suelo es que el uso de suelo urbano induce en no solo problemas de impermeabilización, sino también contaminación por escurrimiento de aguas negras.

Complementando la información en la zona de estudio, Marcelino & Luis (2013) determinaron un tipo de suelo Inceptisol, y que las capacidades de infiltración para uso urbano son de 0.3 cm/hr mientras que en un uso pastos es de 0.5 cm/hr y en uno de cultivos es de 1.0 cm/hr. Junto con estos datos obtenidos, también se determinó la capacidad de infiltración (Cf) de 0.71. Determinaron una capacidad de moderada a baja, debido a los suelos arcillosos meteorizados, cenizas finas y lahares presentes.

Cabe destacar del presente estudio el análisis de calidad de agua, tema que ha sido señalado como de vital importancia por el MINAE. En el estudio determinaron que las fuentes principales de contaminación de las aguas serían desechos jabonosos, fecales e hidrocarburos provenientes de la parte urbana, así como desechos agroquímicos provenientes de la parte agrícola de la zona. La cantidad de desfogues presentes y los estudios químicos tomados de la zona indican que no se deben permitir más el uso de tanques sépticos, desfogues industriales sin tratamiento y además deben de realizar una protección absoluta en los márgenes de los ríos.

Una recomendación obtenida fue que, si bien en los análisis de contaminantes en los acuíferos de las cuencas de los ríos Segundo y Quebrada Seca aparecen bajos niveles de contaminación, se debe tomar medidas cautelares para mantener estos acuíferos en condiciones idóneas. Indican textualmente que “La recarga por infiltración directa, percolación en ríos influentes y acequias, dentro del cantón, puede verse afectada por contaminación de desechos, del gran uso urbano predominante y de cultivos en el cantón, lo que implica una amenaza a la calidad de las aguas subterráneas y una perturbación importante en el flujo natural de las aguas superficiales y subterráneas por el manejo y uso intensivo de ellas”. (Marcelino & Luis, 2013).

Ahondando en el tema de contaminación, se han realizado estudios por parte de la Universidad Nacional, donde se han realizado diferentes talleres, visitas de campo e investigaciones. Tal es caso de estudios de calidad de agua, como el de Quirós (2007), el cual determina los contaminantes encontrados en mediciones tomadas de abril a mayo. Se tomó 24 muestras en las que encontraron alta contaminación y recomienda uso de plantas de tratamiento para reducir cantidad y/o concentración de contaminantes.

La Comisión Nacional de Emergencias realizó una inspección en Quebrada Seca para determinar los daños provocados por la inundación del 13 junio de 2007. El análisis determinó 274 viviendas dañadas, 8 puentes dañados, 40 comercios afectados, alcantarillado pluvial de Belén dañado, inundaciones en distrito de San Antonio, entre otras. Evaluaron aspectos físicos posiblemente causantes de las inundaciones dentro de la cuenca:

- Biofísicos (sismología, erosión, cambios en patrones climáticos y aumento de crecimiento urbano).
- Ambientales (Sobrecarga de áreas impermeables, Precipitaciones altas, invasión a las zonas de protección, aumento de basura y perforación de pozos sin permisos).

- Contextuales (falta de planes reguladores en esa época, falta de cultura de prevención de riesgo en las alcaldías y falta de concientización para disminuir contaminación a los ríos).

También de importante mención, la Comisión Nacional de Desastres concluye en esa época que el incremento de urbanizaciones, estimado en un aumento del 10% entre 2000-2007 ha generado un cambio en el cauce del río y en la capacidad de absorción del suelo, además de la cantidad de prácticas ilícitas de vertido en el río. Con este estudio se decretó como emergencia nacional, se asignó un monto para que, en conjunto con la Municipalidad de Belén, se iniciaran proyectos de dragado en el río, construcción de muros de gaviones y demás estructuras de contención.

Por último, cabe señalar la actuación de la Comisión Interinstitucional para el Manejo de las Micro Cuencas Metropolitanas de la Provincia de Heredia (CIMH). La más sobresaliente fue en agosto 2005, cuando realizó un proyecto de gestión integrada de la cuenca Burío-Quebrada Seca, cuyo objetivo era crear un esquema de sostenibilidad del recurso hídrico en el que involucraría al sector gubernamental mediante reuniones para evaluar la situación y diseñar un plan de trabajo. También, en las reuniones, señalan la importancia de estímulos de integración municipal para una mejor responsabilidad ambiental y una mejor vinculación con instituciones competentes para el estudio y formulación de planes.

2.5 Características generales del área de estudio

El área de estudio subcuencas, se localiza entre las coordenadas 9.96° – 10.09° de latitud Norte y 84.05° – 84.21° longitud Oeste, y pertenece a la parte Noroeste de la Gran Área Metropolitana. El área aproximada es de 72 km^2 . La precipitación anual es de 2042.4 mm y la temperatura promedio es de 24.8°C . Las subcuencas que se encuentran en el área de estudio corresponden a Quebrada Bermúdez y Río Bermúdez, abarcando distintos municipios, cubren sectores de los cantones de San Rafael de Heredia, Barva, Heredia, San Joaquín de Flores, Belén, San Pablo, San Isidro, una pequeña parte de Santo Domingo y otra pequeña parte de San Rafael de Alajuela (Figura 2).

La subcuenca de río Quebrada Seca está conformada por dos principales afluentes: el río Burío y Quebrada Seca. El río Burío nace en el distrito de Los Ángeles del cantón de San Rafael, mientras que el río Quebrada Seca nace en el caserío de Getsemaní, también del distrito Los Ángeles de San Rafael. Estos se unen en el distrito de Mercedes Sur, en el cantón de Heredia. Por su parte, la subcuenca del río Bermúdez está conformada por los

ríos Turales, Pirro, Quebrada Guaria y Gertrudis. Nace en las faldas del cerro Chompipe, distrito de concepción de San Rafael, conforma varios distritos de Heredia: San Francisco y Ulloa; de San Rafael: Ángeles y Santiago; de Santo Domingo: San Vicente y Santa Rosa.

Además, esta microcuenca posee altas pendientes, su altura cambia de su punto más bajo de 848 msnm a su más alto de 2260 msnm. Observando su perfil longitudinal, en la Figura 3, vemos como la pendiente fuerte podría provocar concentraciones rápidas de agua en el cauce del río; de igual manera, observando el perfil transversal (Figura 4), se aprecia una principal división entre los principales afluentes de la cuencas de los ríos Bermúdez y Quebrada Seca, siendo Bermúdez el de mayor capacidad volumétrica.

Analizando las características de la cuenca Quebrada Seca-Rio Bermúdez, vemos que por cada uno de los pueblos que pasan los ríos Quebrada Seca y Rio Bermúdez se suscita intervenciones humanas en sus márgenes. En el cauce se está restringiendo en forma de cuello de botella en los puentes que no soportan el caudal generado por un evento de lluvia de alta precipitación, provocando una inundación en los distintos puntos que recorre los municipios de la parte de abajo.

2.5.1 Descripción climática del área de estudio

Según el IMN (2009), el clima de la región central es influenciado tanto por condiciones del Pacífico (como lo son vientos ecuatoriales) como por condiciones del Caribe (vientos alisos). Con los fenómenos de variable climática que ocasionan eventos lluviosos, se esperan incrementos de 27 % del promedio anual. Los eventos lluviosos están asociados al ENOS, el 75 % de los casos asociados a La Niña.

ProDus (2013) indica una temperatura promedio mensual máxima de 29.2 °C, mínima de 10.3 °C; la humedad relativa varía de 79%, en febrero, a 90% para setiembre. En su diagnóstico, establecen precipitaciones de alrededor de 3000 mm a 2500 mm anuales en temporada lluviosa de mayo a noviembre y alrededor de los 300 mm a los 250 mm en temporada seca de diciembre a abril.

Además, la distribución zonal de la lluvia, según PRUGAM (2009), va de 1850 mm en la parte baja de la cuenca, a alrededor de los 2400 mm en la parte media y alta de la cuenca. Además, menciona que la lluvia es de carácter convectiva y de gota gruesa; también se menciona que es muy difícil que la lluvia tenga la misma intensidad en todos los cantones. Por último, el diagnóstico de ICE (2008) menciona que en las dos primeras horas de las tormentas comunes caerá el 50% de toda el agua.

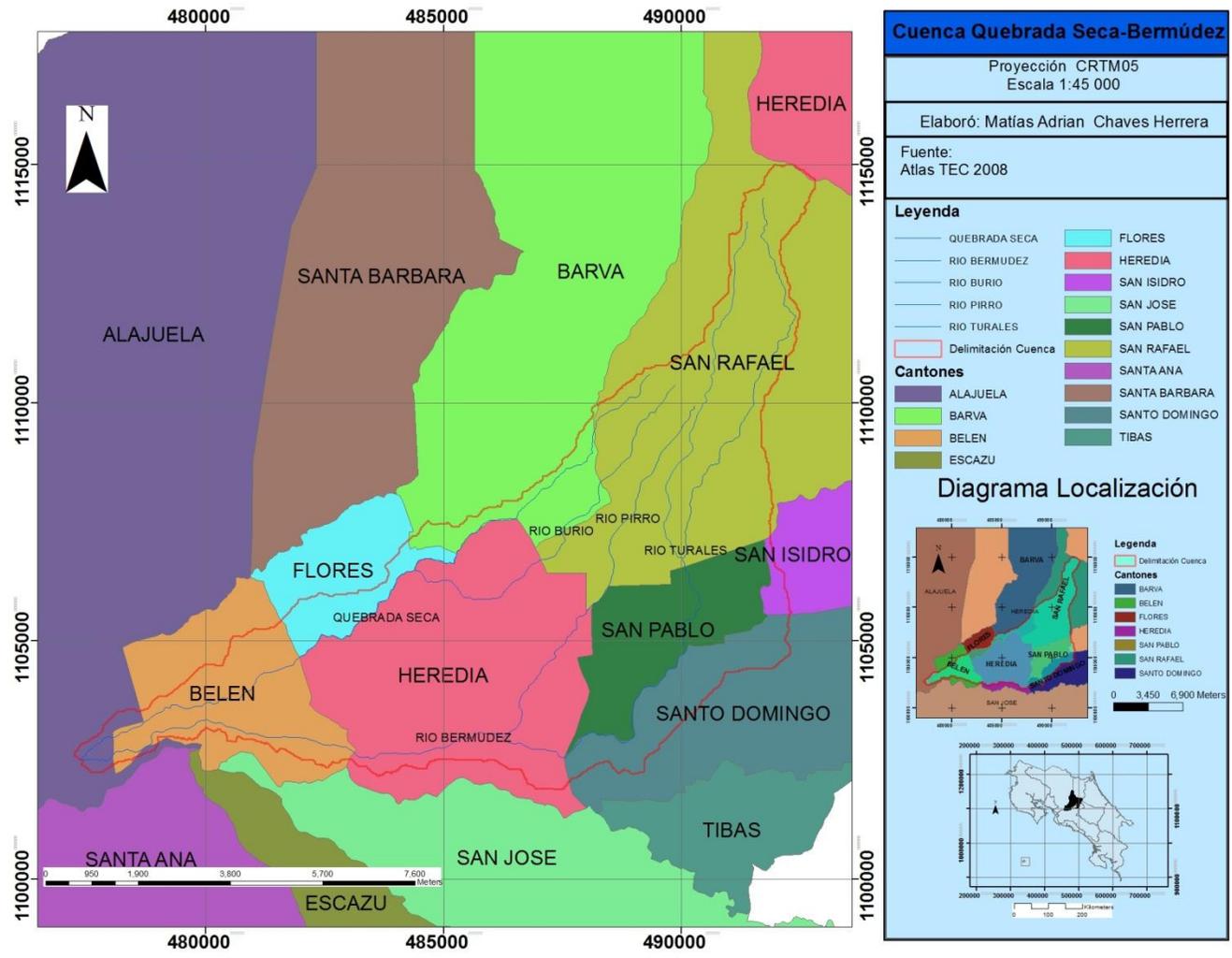


Figura 2. Distritos que conforman el área de estudio.

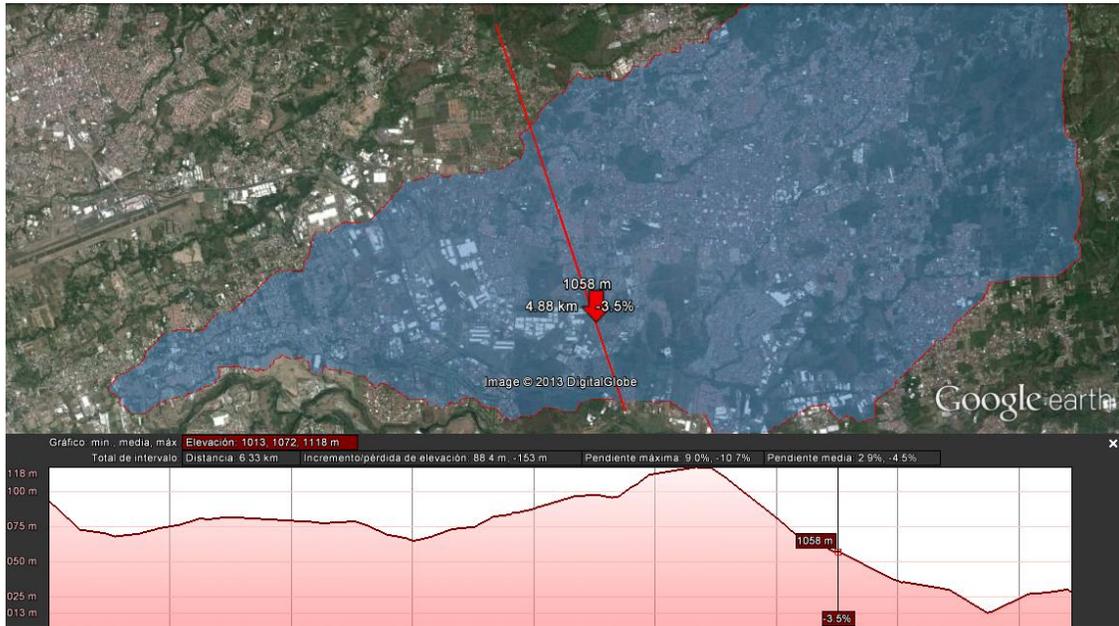


Figura 3. Perfil Transversal de la Cuenca. Fuente: Google Earth.

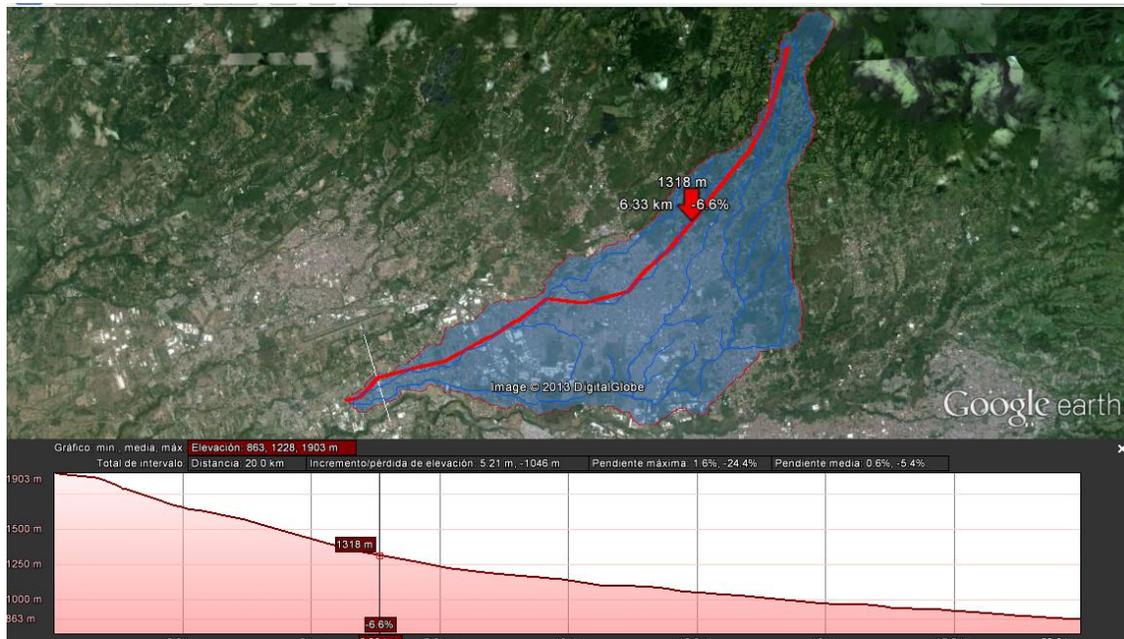


Figura 4. Perfil Longitudinal de la subcuenca Quebrada Seca. Fuente: Google Earth.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Visita a las Municipalidades

Se entrevistó en las Municipalidades a las personas a cargo del área relacionada con la conservación de las cuencas Quebrada Seca y río Bermúdez. Las preguntas serán realizadas a partir de un cuestionario uniforme para todas las municipalidades. Con las respuestas de las municipalidades respectivas, se analizarán sus necesidades para conocer que requieren en la toma de decisiones con respecto al manejo de la cuenca.

3.2 Descripción del cambio de uso de suelo en Quebrada Seca

Se procedió a obtener imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés. Se buscó en sus bases de datos las imágenes que tuvieran la menor cantidad de nubes. De esta manera, se escogió, en el rango de años, del 2000 a 2012. El satélite Landsat 7 abarca los años de 2005 a 2012, sin embargo, este presenta un problema en su lente que ocasiona en algunas imágenes distorsión. Aunque la localización de la subcuenca está en un lugar en donde no se presenta esta distorsión. Se escogió imágenes Landsat de enero en los años 2008, 2012 y de julio del 2001, ya que contaban con los requerimientos previamente dichos. En la Tabla 6 podemos ver las especificaciones de los recursos utilizados. Mediante los programas SIG, se digitalizó polígonos de uso de suelos, provenientes de las imágenes satelitales, obteniendo un mapa de uso de suelo de la cuenca; a partir de este mapa, se generará un mapa de condición hidrológica de la cuenca. Mediante el uso del programa ARCMAP 10, se procedió a trabajar las imágenes satelitales y realizar una clasificación supervisada y no supervisada. Se seleccionaron dos composiciones de banda para representar con claridad el uso de suelo, la bandas 3, 2 y 1 (color verdadero) y la configuración de bandas 4, 5 y 7. Para la clasificación supervisada, se escogieron polígonos representativos del tipo de uso de suelo para generar las firmas espectrales que se requieren para realizar los análisis. En la clasificación no supervisada, se escogieron 16 clases, para que mediante comparación con imágenes del orthorectificadas de Catastro para así verificar las clases generadas por la imagen Landsat y determine a qué tipo de clase pertenece. Las clases con que se clasificará la imagen satelital se pueden observar en la Tabla 9.

Por otra parte, el Programa de Regularización de Catastro y Registro que tiene como objetivo contribuir al ordenamiento territorial. Gracias a este proyecto se han obtenido datos relevantes del territorio nacional, como lo son altimetría, hidrografía, delimitación de áreas urbanas, vías de comunicación, entre otros. Además, el programa ha realizado un

proceso de ortorectificación de imágenes satelitales y vuelos aéreos, por lo que se cuentan con ortofotos de alta resolución (pixel de 52 cm) de la Gran Área Metropolitana tomadas de vuelos del 2007 y 2008.

Tabla 6. Descripción de las imágenes obtenidas para la base de Datos.

Fuente	Escala
Imágenes Satelitales Lansat 7 ETM+ (Enero 2008, Enero 2012 y Julio 2001)	30 metros de Resolución
Levantamiento Catastral 2007	1:1000
Imágenes orthorectificadas de Catastro 2007	1:5000

3.2.1 Clasificación de imágenes satelitales

Debido a que por ley toda información geoespacial debe ser proyectada al sistema de referencia CRTM05, a las imágenes se les debe realizar un proceso de georeferenciación para asignarles las coordenadas referentes a este sistema.

Para la georeferenciación se requiere de las funciones de transformación, estas son funciones de primer, segundo o tercer grado, cuyos coeficientes se calculan por un ajuste de mínimos cuadrados a partir de puntos idénticos, cuando es aplicada la transformación su ajuste o la calidad del ajuste suele ser presentado mediante el RMS o error medio cuadrático, que es una medida de la exactitud del punto de referencia con la imagen a referenciar. No obstante, este solo proporciona una subestimación del error. Para realizar este proceso, requerimos de una imagen que ya esté con el sistema de referencia CRTM05.

Se cuenta con las imágenes Ortorectificadas de regularización y catastro, por ende, se procede a referenciar las imágenes Lansat a estas imágenes. Se debe crear puntos de control, es decir, puntos en la imagen Lansat que coincidan con los puntos de la Orthofoto. Luego estos puntos serán usados como parámetros para la función de transformación al nuevo sistema de coordenadas. Es recomendable utilizar un RMS que esté por debajo del tamaño del pixel de la imagen, ya que este es el límite de resolución. Para comprobar, el ajuste se requiere de una fuente de mayor exactitud o una visita de campo. Para un polinomio de primer grado, se requiere de un mínimo de 3 puntos de control; 6 puntos para segundo grado; 10 para tercer grado; siguiendo así por cada ecuación. Inclusive es altamente recomendado utilizar 3 veces el número mínimo marcado por la ecuación (Gurtierrez, 2010).

Además se realizó una matriz de confusión a la imagen Landsat del 2012 para determinar el error de clasificación, se asignaron 30 puntos de control para cada clase, para un total de 180 puntos. Se obtuvo el porcentaje de exactitud de la clasificación con la orthofoto y la constante kappa correspondiente de la matriz.

3.3 Modelación hidrológica

Como parte de la configuración del modelo hidrológico es necesario calcular distintos parámetros que requiere para efectuar la simulación. De los distintos métodos existentes se escoge el número de curva el cual es sumamente efectivo para calcular escurrimiento mediante asignación del número de curva que representa características uso de suelo como su textura. Por lo tanto se determinaron las características del suelo, su uso y se asignó el número.

El siguiente parámetro, también muy importante es la lluvia con la que se obtiene la lámina de agua que caerá en la zona, en este estudio se utilizó las láminas de agua de diferentes periodos de retorno como de diferentes duraciones, para presentar un amplio rango de situaciones que suceden o podrían suceder en la zona. Seguidamente se debe determinar el hietograma correspondiente a las láminas escogidas para poder ingresar estos datos a la simulación.

Lo siguiente parámetros que determinó son los tiempos de concentración que presentan cada subcuenca, el cual indica lo que tarda el agua en llegar al punto de salida de la cuenca. Otro parámetro determinado es el tránsito de avenidas para las conducciones del agua por los ríos. Por último, se realizó la validación del modelo mediante la medición de un evento registrado para colaborar la exactitud del modelo con la realidad.

3.3.1 Mapa de número de curva

Para asignar el número de curva, se deben analizar los aspectos del tipo de suelo para determinar la infiltración. La textura es el principal factor de la infiltración, por ello se buscarán estudios con estos datos en investigaciones, programas gubernamentales y/o en planes reguladores. Al no contar con un estudio detallado, se procedería a utilizar un proceso de filtrado identificando el mapa de tipos de suelo de Costa Rica (Atlas 2008, Tecnológico Costa Rica), el cual tiene la clasificación de los suelos en sus órdenes y grupos taxonómicas, dicho mapa puede observarse en la Figura 5.

Seguidamente se determinó la capacidad de drenaje mediante comparación con la tabla del Manual Descriptivo de Uso de la Tierra de Costa Rica (Consultora Acón y Asociados, 1991), Tabla 7, la cual describe el tipo de drenaje para cada tipo de suelo. Con ayuda de una Tabla 8 que indica el grupo hidrológico según su respectiva infiltración (Muñoz, 2005) se identificará el grupo hidrológico a cual pertenece.

Teniendo identificado el grupo hidrológico, se determinó el número de curva según el tipo de suelo. Se asumió grupo hidrológico B, condición pobre y práctica de cultivo conforme las curvas de nivel para las distintas clasificaciones, para de esta manera establecer una condición crítica.

Tabla 7. Clasificación de Grupo Hidrológico. Fuente: Manual de Suelos MAG

ORDEN	GRUPO	Drenaje	Permeabilidad
ALFISOLES	HAPLUSTALF	Bueno	Sin referencia
ENTISOLES	USTORTHENT	Bueno	Moderada
INCEPTISOLES	DYSTRANDEPT	Bueno	Moderada
INCEPTISOLES	HYDRANDEPT	Bueno	Sin referencia
INCEPTISOLES	USTROPEPT	Bueno	Moderada
ULTISOLES	TROPOHUMULT	Moderado	Moderado
VERTISOLES	PELLUSTERT	Moderado	Moderado

Tabla 8. Grupo Hidrológico según tipo de infiltración. Fuente: (Muñoz, 2005).

Potencial escurrentía	Textura	Infiltración	Grupo Hidrológico
Mínimo	Ar Ar-L (Arenas y loess profundos).	Rápida: 8-12 mm/h (Drenaje perfecto)	A
Bajo	F-Ar; F; F-a-Ar; F-L (Arenas y loess poco profundos).	Moderada: 4-8 mm/h (Drenaje bueno a moderado)	B
Medio	F-a; F-a: L; a-Ar (Suelos delgados o suelos arcillosos).	Lenta: 1-4 mm/h (Drenaje imperfecto)	C
Máximo	a (Vertisoles, suelos muy arcillosos, muy poco permeables o con horizontes limitantes).	Muy lenta: 0-1 mm/h (Drenaje pobre a muy pobre)	D

Tabla 9. Referencia para la clasificación supervisada de las imágenes satelitales.

Nombre	Descripción	Identificador
Bosque	Primario como secundario, se puede observar su extensión a lo largo del terreno, polígonos al azar.	
Cultivos	Presentan un tipo de orden, como líneas que representan las líneas de siembra.	
Pasto	Áreas donde se observa el color verde perteneciente a plantas.	
Urbano (rural)	Propiedades que cuentan tanto con porcentaje alto de zona verde y una construcción tipo casa.	
Urbano (centro)	Lugares ubicados en las cerca del centro de las ciudades donde las casa están una a la par de la otra.	
Industrial/ Comercio	Lugares que se observa ocupan bastante área y se conoce por visitas que su función es para industria y comercio.	
Suelo descubierto	Lugares donde es apreciable que no se tiene cobertura vegetal o es escasa.	

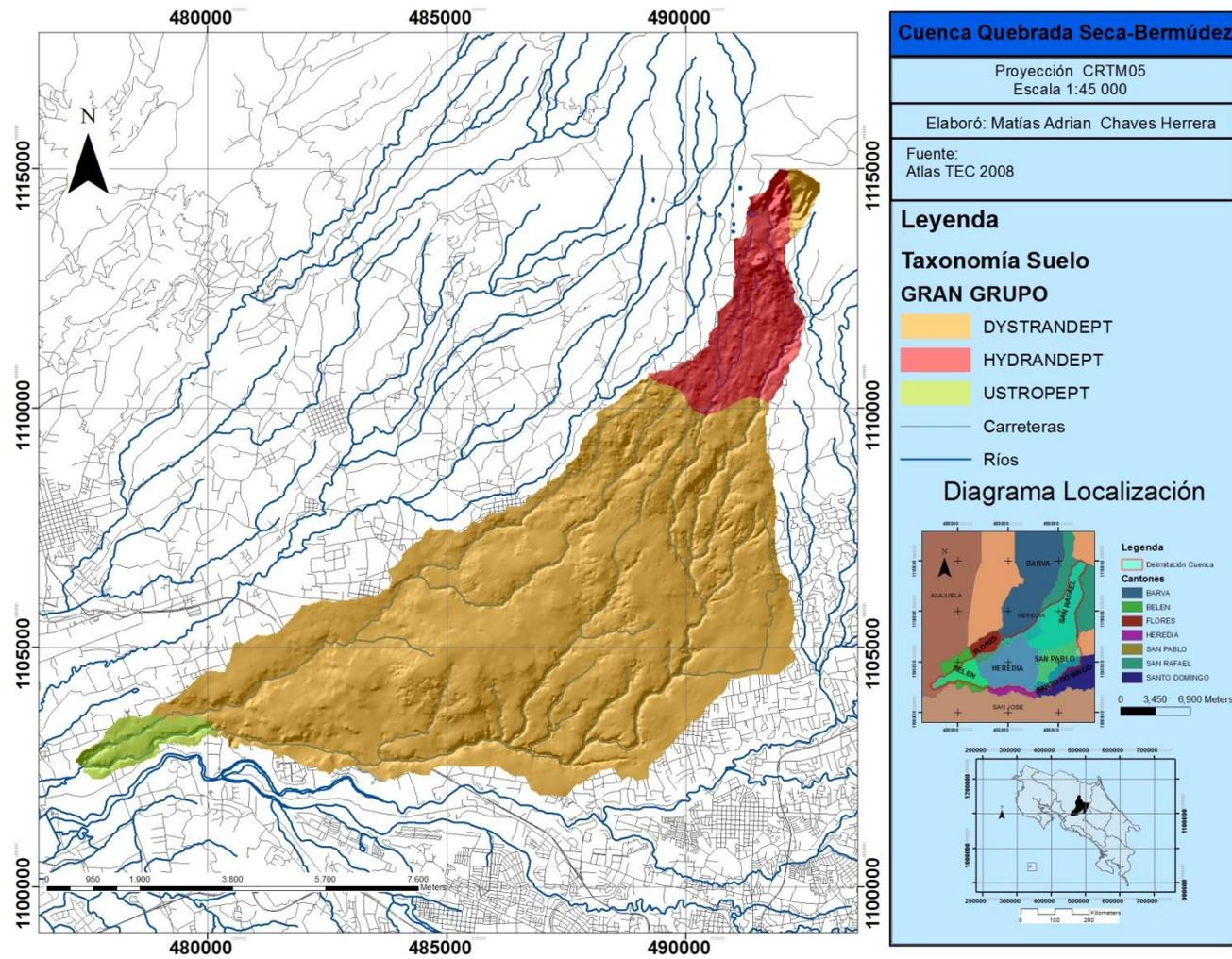


Figura 5. Mapa de suelos de la cuenca Quebrada Seca y Bermúdez.

3.3.2 Periodos de retorno de la lluvia de diseño

Basados en la delimitación del área de estudio que abarca los cantones de Barva, Heredia, San Rafael, Flores y Belén, se ubicaron las estaciones meteorológicas más cercanas. Estas son la del Aeropuerto, San José, y Santa Bárbara. Se solicitó los datos pluviográficos de las estaciones al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), datos de precipitación horaria, diaria y mensual.

Los datos de lluvia fueron analizados para encontrar las tormentas más significativas de cada año. Se obtuvieron las intensidades máximas para duraciones de 60, 120, 240, 300, 600, 900, 1440 minutos y periodos de retorno de 5, 10, 25,50 y 100 años.

Se realizó un análisis estadístico mediante el programa HidroEsta2. A través de este se analizó diferentes distribuciones estadísticas y se determinó la distribución que mejor se ajusta a los datos, para así aproximar las láminas de lluvia según el periodo de retorno que se indique.

Estas láminas de lluvia se ingresaron a la modelación en HEC-HMS para encontrar los caudales de diseño. Para la obtención de caudales pico, se escogió el parámetro de número de curva del SCS como método de pérdida; para el método de transformación, se utilizó el hidrograma unitario SCS, y para el tránsito de caudales, se escogió el método de Muskingum-Cunge.

Con el modelo configurado se simuló el evento máximo de lluvia en dos escenarios a futuro: uno proyectado a 2020 y el otro según los planes reguladores; de esta manera, se obtendrá datos de los caudales generados por el evento, para tener una referencia del impacto que producen.

3.3.3 Hietograma de diseño

El hietograma de diseño se obtuvo al graficar los datos de los periodos de retorno de las láminas de lluvia y obtener las ecuaciones de las líneas de tendencia de los datos. Con las ecuaciones de las líneas de tendencia se procede a interpolar la lluvia a un intervalo de tiempo de 30 minutos. De esta manera, se podrá realizar una distribución de la tormenta mediante el método de bloques alternos. Se requiere de un hietograma por tormenta, por lo que se procede a seleccionar las láminas de agua de 3 periodos retorno (5, 10 y 25 años) con tres duraciones distintas (6, 12 y 24 horas). Cada uno de estos 30 datos de láminas de lluvia se distribuye en tormentas con las duraciones respectivas.

3.3.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es requerido para el modelo HEC-HMS, ya que se requiere del dato de tiempo de retardo de la cuenca o retraso entre el pico del hietograma de entrada y el pico del hidrograma de salida. Mediante el método de SCS, se establece que este tiempo es igual a 0.6 del tiempo de concentración. Para efectos de comparación y análisis, se calculó el tiempo de concentración usando las siguientes ecuaciones: Kirpich, de Federación de Aviación Estadounidense (FAA), Servicio de Conservación de Suelo (SCS), la de onda cinemática y de la isócronas. Una vez analizadas, se obtendrá su media aritmética y se decidirá cual ecuación se ajusta mejor a esta media, que, en conclusión, representa mejor las características de la cuenca.

3.3.5 Tránsito de avenidas

Debido a las longitudes de algunas de las subcuenca y para asegurarse de la adecuación del flujo de agua en la cuenca, se utilizaron los tránsitos de avenidas en la modelación. Estos realizan una representación de tramos de los ríos. Estos tramos o “Reach”, como se representan en HEC-HMS posicionados en la cuenca, son tramos grandes de río provenientes de las subcuencas que llegan a representar a río Quebrada Seca, junto con río Bermúdez y que transitan el caudal o hidrograma de las cuencas localizadas aguas arriba hacia el punto de descarga o unión. Se escogió el método de Musking-Cunge para modelar estos tramos. Este método requiere de longitud del cauce, pendiente, n de manning y geometría del cauce. Mediante exploración de campo, se pudo notar que, en varias partes del río, este se asemeja a un rectángulo. Para la n de manning se escogió 0.045 basado de igual manera en exploración de campo y caracterización según valores de n Manning de la literatura.

3.3.6 Validación y generación de modelos

Si bien una modelación es una aproximación de la realidad, para obtener una adecuada confiabilidad del modelo hidrológico este debe de ser validado mediante un evento real. Para esto se debe de tener un evento con algún registro o medición efectuado durante o después del suceso.

Así pues, para el proceso de validación se utilizará la calibración hecha por Segura (2004), quien, mediante un evento registrado el 2 de octubre de 2004, logró calibrar el modelo

hidráulico de HEC-RAS en el puente de la bodega ubicado en Belén; tal evento registró una elevación máxima del agua de 2.3 metros en el punto de desfogue localizado en el puente de la Bodega localizado a latitud 9.982314 y longitud -84.176312, 300 metros norte de carretera avenida 111, Belén de Heredia. En esta calibración hidráulica para esta elevación el modelo registró un caudal de 127 m³/s.

Para validar el modelo hidrológico basado en este caudal, se tomaron solamente la cuenca de Quebrada Seca (Figura 7). Se ubicó el punto donde se encuentra el puente (Figura 6) y se colocará una unión para conocer el caudal que pasa en ese lugar.

Para recrear el modelo en HecRas se ingresaron 12 secciones transversales ingresadas por Segura 2004. La sección correspondiente al registro de la altura, 4 secciones después aguas abajo y 7 secciones aguas arriba de este. Esto con el fin de que el modelo logre realizar la misma modelación pero sin tener que ingresar todas las secciones transversales.

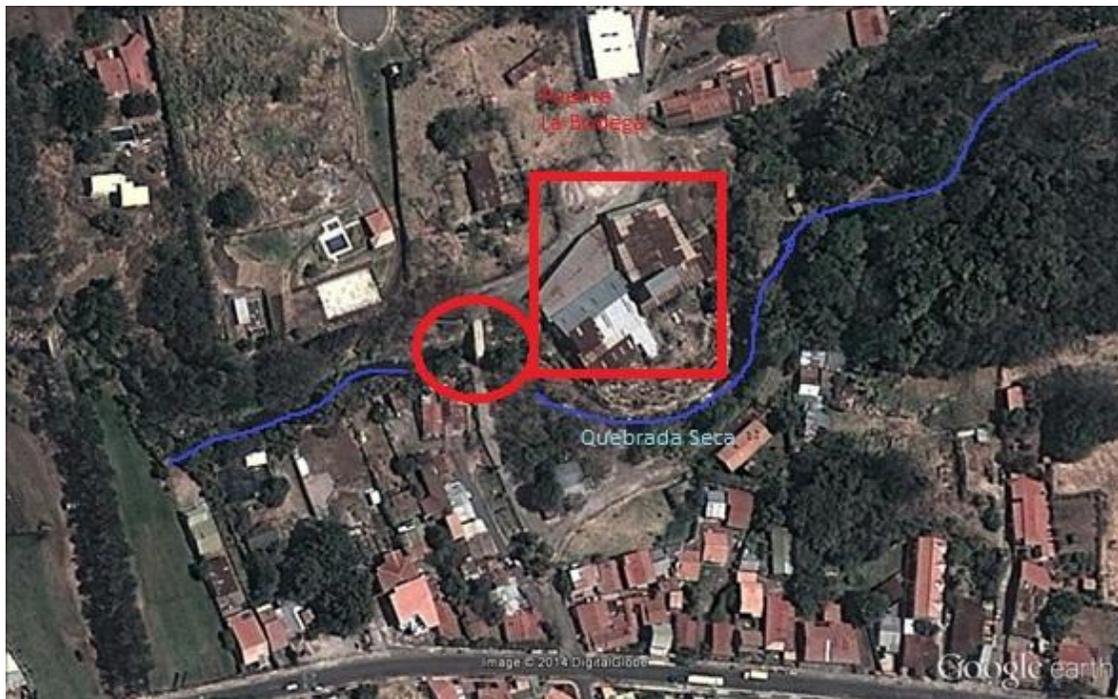


Figura 6. Vista del puente la Bodega mediante Google Earth.

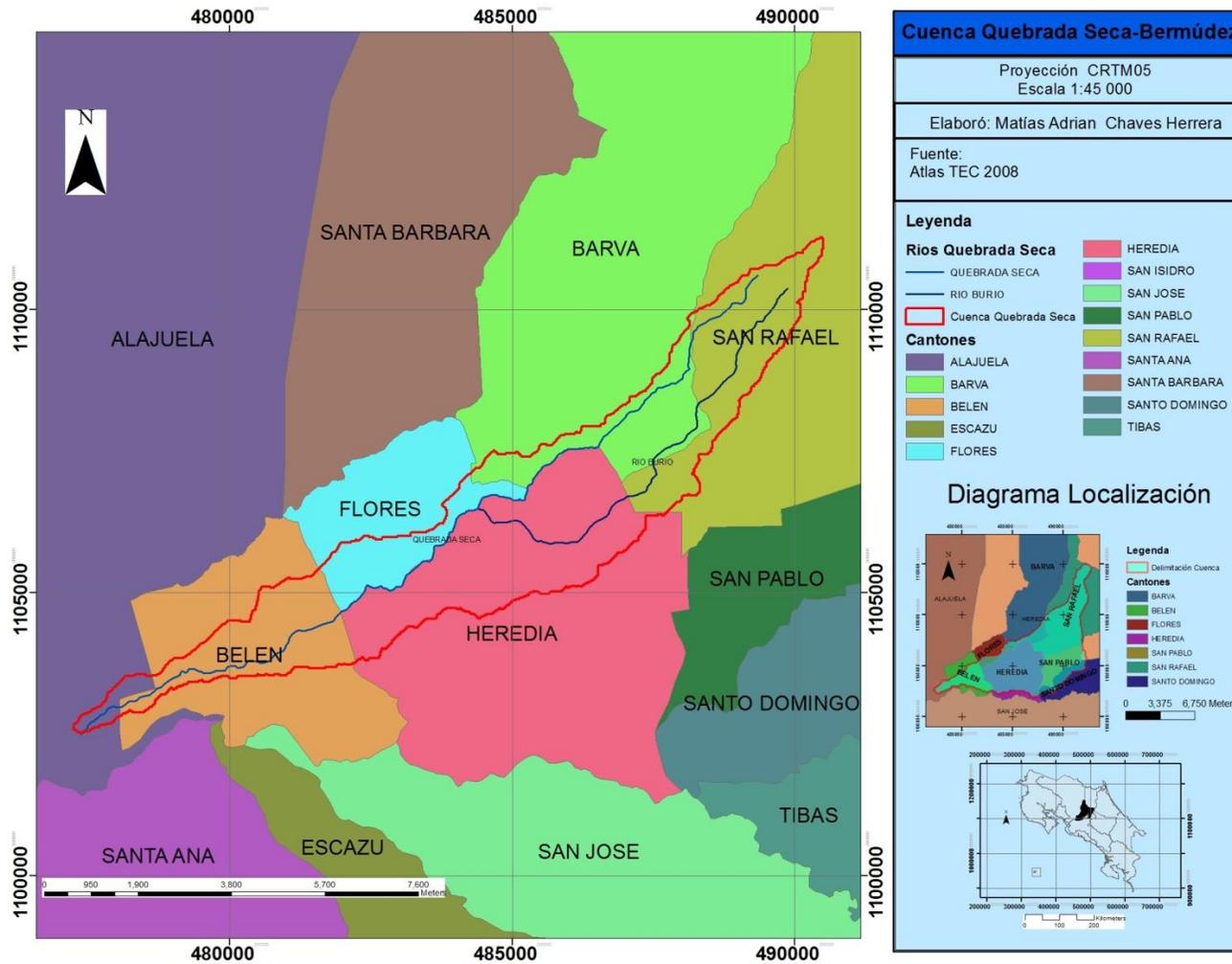


Figura 7. Cuenca de Quebrada Seca-Burío.

Capítulo 4. Investigación local

Para proponer una gestión integral de Recursos Hídricos de la cuenca de los ríos Quebrada Seca y Bermúdez, es de vital importancia conocer los aspectos sociales y políticos que se suscitan en la cuenca, conocer las necesidades de los gobiernos locales involucrados, sus esfuerzos, sus intervenciones, sus planes reguladores y la visión a futuro que tiene para los próximos años.

Es necesario así recolectar datos relevantes del área de estudio, investigaciones hechas en la misma para, de esta manera, crear una investigación que vaya acorde a la realidad de la zona de estudio. Es por ello que se realizó una investigación de reportajes históricos, estudios realizados en la cuenca y diferentes entrevistas con profesionales que están involucrados en el manejo de cuenca; con el objetivo de dirigir esfuerzos para que sea un trabajo complementario, plantear nuevas ideas para futuros proyectos, aportar ideas que permitan enfocar los esfuerzos y que estos no se repitan.

La metodología empleada fue la realización de un cuestionario del cual se preguntaría aspectos de la situación actual y hechos del pasado, trámites administrativos, magnitud de los desastres, programas de remediación, acciones de prevención, herramientas o metodologías empleadas para solucionar problemas de inundación, además de aspectos administrativos o legales.

Aun así, dependiendo de cómo la entrevista sucedía, se realizarían otras preguntas o eliminarían algunas en el caso de que la municipalidad por diferentes razones no haya implementado esfuerzos en las áreas antes mencionadas.

4.1 Referencias históricas de inundaciones en Quebrada Seca

Para ver la gravedad de los efectos de inundación en Heredia, basta con ver varios reportes en los periódicos (Tabla 10) que señalan los desastres debido a inundaciones en la zona:

Tabla 10. Descripción de reportajes en la zona.

Nombre, fecha y fuente	Descripción	Fotografía
<p>Fuerte aguacero destruyó 27 viviendas en barrio herediano (Otto Vargas M, la Nación, 22/07/2010).</p>	<p>“La Comisión Nacional de Emergencias (CNE) reportó otros problemas por inundaciones en San Pablo de Heredia (20 casas) y en Pérez Zeledón (15). El fenómeno obligó esa noche a llevar a 153 personas a cinco albergues en Santo Domingo, La Suiza de San Rafael (Heredia), Los Guido (Desamparados), La Ceiba de Buenos Aires (Puntarenas) y Cachí (Paraíso, Cartago).”</p>	
<p>Caos urbano y basura disparan inundaciones en 45 cantones (Vanessa Loaiza N. la Nación, 22/08/2010).</p>	<p>“Todas las emergencias naturales de esos 21 años le dejaron a Costa Rica pérdidas por \$1.823 millones, de los cuales \$1.161 millones correspondieron a los daños causados por lluvias, deslaves e inundaciones... aunque las municipalidades cuentan con planes reguladores, hoy tienen que lidiar con comunidades que llevan años afincadas en laderas de ríos o en áreas de excesiva pendiente.”</p>	

4.2 Entrevista a la Municipalidad de Belén

El cantón de Belén, históricamente, ha sido el más afectado. Esto debido al gran crecimiento urbanístico, no solo en sus límites, sino en varias zonas de la cuenca. Por lo tanto, se procedió a contactar a esta institución. Primeramente se realizó una entrevista con el Sr. Hermis Murillo encargado del área de sistemas de información geográfica. El Sr. Hermis Murillo comentó lo realizado en la cuenca, pero remitió al área de Ambiente de la Municipalidad. Allí la gestora de ambiente Sra. Dulce Jiménez Espinoza, en conjunto con el Sr. Esteban Ávila Fuentes y el Sr. Óscar Hernández Ramírez. Explicaron cómo el cantón

de Belén han realizado varias intervenciones desde hace más de 10 años. Aseveran que, de muchos de los esfuerzos realizados, muchos han fracasado y muchos recursos se han utilizado en esfuerzos paliativos para aliviar la problemática pero no para resolver el problema.

Añadieron que el río Quebrada Seca presenta la problemática de la basura desde hace tiempo, provocando no solo la contaminación de los ríos, sino un taponamiento en los puentes debido a su acumulación. Ello genera serios problemas de inundación cuando se presenta una fuerte tormenta.

Actualmente, Belén ha estado realizando un mapeo de la zona del río Quebrada Seca, levantando datos topográficos y perfiles de los puentes. Se está solicitando un estudio hidrológico a toda nueva propuesta de urbanización. La señora Jiménez señala a que toda nueva construcción que se realice en Belén debe de presentar un estudio hidrológico y en caso que se requiera de un sistema para manejo de las aguas de escorrentía, se solicita una laguna de retención o alguna otra medida de mitigación.

Como estudio más importante a mencionar es el de un pre diseño de un trasvase realizado por técnicos del ICE. Al terminar el pre diseño, la Municipalidad, por cuestiones presupuestales, decide no seguir con la siguiente fase. El estudio tenía tres etapas de diagnóstico, no obstante solo se realizó la primera etapa. Además, la idea del trasvase también fracasa debido al impacto ambiental y social (reubicación) que conlleva este trabajo.

Continuando con las intervenciones en Quebrada Seca, los desastres provocados por la inundación de la avenida del 13 de junio del 2007 llevaron a la Comisión Nacional de Emergencia a asignar fondos para reparación y generar medidas cautelares para próximas avenidas. Según el estudio realizado por el ICE, esta fue una avenida producida por una precipitación con un periodo de retorno de 5 años, con una ocurrencia de 20%.

El Sr. Esteban Ávila, informa acerca de un informe del MINAE de las labores realizadas para solventar el desastre de 2007 y recomienda la continuación de obras de mantenimiento. Después de estos sucesos, el MINAE realiza 2 trabajos más en conjunto con la Municipalidad de Belén. Además menciona otros proyectos como recaba en el lecho, dragado, entre otros, pero observan que, debido al sedimento que se arrastra, el río volvió a estar como estaba antes. Advierte que el río Bermúdez también ha estado dando tantos problemas como el Quebrada Seca.

Otras intervenciones importantes se han hecho, por ejemplo, una localizada en ruta 3, donde se encuentra la Cervecería Costa Rica y otra en el comercio Wal-Mart; allí se realizaron trabajos de entubamiento del río Quebrada Seca, lo que provoca la no infiltración de agua a los bordes del río en esa zona.

Por otra parte, la señora Jiménez comentó acerca de la comisión del voto 4050, Comisión Interinstitucional establecida por la Sala Cuarta, debido a una demanda impuesta por un poblador acerca de los problemas de inundación y basura en Quebrada Seca. Esta comisión está formada por representantes de los municipios Barva, San Rafael, San Joaquín de Flores, Heredia y Belén; además de instituciones públicas como ESPH, MINAE y Federación de Municipalidades.

Esta comisión, desde su creación, en el 2005, ha estado ejecutando un plan de acción integral en la cuenca para solventar los problemas de inundación; han efectuado esfuerzos de limpieza, concientización social, levantamiento de puntos de contaminación, diagnósticos en la zona y diferentes estudios relacionados con la contaminación del río.

Las mayores limitantes de la comisión es que a pesar de estar conformada por un equipo técnico que brinda y propone soluciones, no tiene el poder para ejecutarlas, y cuenta con poco presupuesto. Muchas de las soluciones propuestas nunca han sido efectuadas. La falta de vínculo con los gestores de las municipalidades y la comisión ha provocado la falta de eficiencia en las metas de esta comisión.

Ante la presión de Sala Cuarta en resultados de la comisión, la Alcaldía de Heredia decidió reunir a las diferentes alcaldías y presentar un plan integral, mediante la contratación de CIEDES, de la Universidad de Costa Rica para proporcionar un estudio avalado por una entidad universitaria que lo respaldara. El proyecto se encuentra en sus etapas de diagnóstico.

Por otra parte, la señora Jiménez menciona que lo más importante para Belén es el estudio para evaluar la condición de los puentes en la zona por lo que un estudio hidrológico sería lo más adecuado para complementar este análisis.

El Sr. Óscar Hernández, de obras públicas en Belén, menciona como muchas veces se ha basado en el estudio de Serrano (2004) para guiarse a la hora de realizar reparaciones u otros proyectos, por lo que afirma la importancia de actualizar dicho estudio.

Esteban Ávila menciona que requieren de estudios por parte de las universidades y enfocar los esfuerzos y el dinero para llevar a cabo las recomendaciones sugeridas. Recalca lo tedioso y burocrático que puede ser el solicitar un estudio a las universidades públicas,

obstáculo que puede ser vencido mediante modificaciones en las políticas universitarias, con el fin de realizar estudios más rápidamente y aportar lineamientos más objetivos para la toma de decisiones.

En esta misma línea, los entrevistados ven ventajoso que se realicen estudios universitarios para tener este enfoque de objetividad, ya que, por ejemplo, muchos empresarios de urbanizaciones apoyan y presentan estudios de la tecnología de lagunas de retención, pero las municipalidades no están seguras del trabajo realizado por estos. Sin embargo, mediante estudios universitarios, las municipalidades tendrían más criterio para evaluar estas medidas.

Aseveran que requieren de un estudio hidrológico para analizar las causas tener mejores condiciones a futuro. Además, a los entrevistados les interesaría saber aguas abajo, en la confluencia con el Bermúdez, ya que si se realizan cambios en los puentes y se cambian secciones, las personas que viven en esa confluencia y en la zona más abajo podrían alegar que están haciendo que el agua les llegue con más cantidad y rapidez provocando problemas, o, si sucede un desastre natural, podrían dañar las casas que se encuentran en la zona.

4.3 Entrevista a la Municipalidad de San Rafael

Por parte de la Municipalidad de San Rafael, se entrevistó al Ing. Erick Camacho, encargado de la Unidad de Desarrollo Urbano y a la Sra. Marianela Rodríguez, encargada de Gestión Ambiental. En dicha reunión se indicó que como plan de acción ambiental para la Quebrada Seca se han estado dando programas de reciclaje, limpieza del cauce del río y programas de educación ambiental.

Los representantes de la municipalidad han asistido a las reuniones del voto 4050 e indican la importancia de estos esfuerzos, pues comparten la visión de ayuda integral para solventar los problemas, pero señalan que no se ha tenido seguimiento político a la mayoría de las normativas propuestas en la comisión.

El señor Camacho afirma que la normativa de no permitir más proyectos urbanísticos se ha cumplido hasta la fecha para las áreas que aportan a la cuenca de Quebrada Seca, pero para las áreas que aportan para el río Bermúdez se solicita que contengan un sistema para evacuar las aguas como lagunas de retención. Estudios hidrológicos son solicitados para que se demuestre que las aguas serán adecuadamente evacuadas. Además se realizan inspecciones para comprobar las obras.

Se preguntó acerca de la aceptación de alguna obra para la retención de caudal hacia la parte baja de la cuenca. Se comentó acerca de la idea que surgió de construir lagunas de retención grandes en sitios estratégicos de la cuenca, pero esta idea fue rechazada. Se indicó que, por el momento, no harán ninguna obra hasta que salga el estudio solicitado al CIEDES; en ese momento evaluarán las propuestas que salgan del estudio.

No se han hecho levantamientos de puentes o información del puente, pero sí levantamientos de uso de suelo para trámites comunes de la Municipalidad.

Se preguntó cuáles son las necesidades que tiene Municipalidad en relación con la cuenca. Indican la necesidad de un análisis sectorizado, el conocer la capacidad hidráulica del río en distintos puntos para saber en dónde se requeriría una intervención, por ejemplo, un dragado. Además, desean conocer alguna otra metodología para la retención o evacuación de las aguas que se ajuste mejor a las condiciones de pendiente que se maneja en la zona. Conocer el aporte hidrológico por metro cuadrado al área.

4.4 Entrevista a la Municipalidad de Heredia

En la municipalidad de Heredia se entrevistó al Ing. Róger Araya Guerrero, de la sección de ingeniería. Se explicó que, desde el 2007 y con el evento de inundación del 27 de junio de ese año, se ha procedido a realizar un reglamento donde se solicita a cualquier construcción un estudio que indique cómo se verterán las aguas de exceso de lluvia.

En este informe, se solicitan tres cálculos de escorrentía; antes de la construcción, después de la construcción y con el sistema de desfogue. Además, solicita criterios de diseño de las obras para un periodo de 25 años. Se da un margen de poder desfogar el 50% de la totalidad del aporte de aguas pluviales hacia las afueras.

Se indica que, actualmente, solo se está permitiendo la construcción a comerciales y condominios en el cantón, ya que estos presentan la ventaja que llevan un mantenimiento periódico.

Se indicó que el río Bermúdez ya está comenzando a presentar los mismos síntomas que Quebrada Seca presentó antes de la inundación del 2007. Además, se ha detectado situaciones de ciertos deslizamientos y erosión en algunas zonas. Por el momento, se está esperando el estudio del CEIDES para realizar alguna solución a gran escala que incluya a las otras municipalidades.

Indican que les gustaría cuantificar cuánto es el aporte del cantón a los ríos, y cuánta disminución se alcanzaría con lagunas de retención o pozos. Además, se necesita una actualización de la condición de los puentes actuales.

4.5 Entrevista a Federación de Municipalidades de Heredia

Hazel Mora, geógrafa de la Universidad Nacional, encargada de la parte técnica de la Federación de Municipalidades, explicó mediante una entrevista que el esfuerzo más importante para la cuenca de estudio es de la comisión del voto 4050 y dentro de esta comisión la Federación adopta un papel mediador. Mora concuerda con que es importante analizar toda la cuenca, ya que lo que se haga en la parte alta o media de la cuenca repercute en la parte baja. Comenta que la labor de la Federación de Municipalidades es la promoción de acciones que sean colectivas e integrales, acciones enfocadas al desarrollo sostenible. Indica que el río, como ente dinámico de la naturaleza, va cambiando conforme a los años, comenta que el paso del río que una persona asume no necesariamente es donde verdaderamente pasa, ya que el río requiere de un ancho para estar cambiando, si se llega a obstruir esta libertad de movimiento, provoca eventos de inundación cuando suscitan cambios. Señala que debido al evento extremo de 2007 y las posteriores medidas de reconstrucción y mitigación, como el dragado, ha cambiado la morfología del río, por lo que ahora se puede ser un río diferente al analizado anteriormente. Comenta que la Sala Cuarta no permite desfogues en Heredia (centro).

Por otra parte, se ha estado solicitando construir urbanizaciones de manera diferente, por ejemplo, solicitado construir verticalmente, tener planta de tratamiento, y lagunas de retardo para controlar la calidad y la cantidad de agua. Señala que Heredia, a pesar de lo urbanizado que está, tiene 2 grandes terrenos para desarrollarlos. Recalca las conclusiones para el trasvase del estudio del ICE. La de más importancia es que Quebrada Seca ya se llegó a su límite de capacidad de agua. Además, indica que se requiere de un estudio integral de toda la cuenca, contando con secciones donde se vea analizada la parte hidrológica y hidráulica de la zona.

Lo estudiado de la cuenca Quebrada Seca por la Federación concluye que la situación más crítica son los puentes en la cuenca que actúan como cuellos de botellas, los estrangulamientos del río por desechos, las zonas de protección invadidas, pues no hay por donde el agua pueda infiltrar. Esto en conjunto con características de la cuenca de pendiente fuerte y lluvia intensa que provoca una rápida crecida de agua. Además, se tienen estudios de grado de calidad de agua, siendo el más relevante el detectado en el distrito de Mercedes con altos contaminantes.

Comenta que en la Comisión discutieron de tecnologías para controlar la cantidad de agua. Las que más llamaron la atención fueron las lagunas de retención, pero requieren que estudios para demostrar la efectividad de estos métodos, además de contar con un criterio objetivo para los estudios. Indica que los planes integrales propuestos en la comisión no han visto la luz, debido a que los estudios técnicos cuestan dinero. Lo que sí se ha logrado realizar es una caracterización que dice qué es lo que se tiene y cómo se debe manejar.

Se afirma la necesidad por parte de las municipalidades el saber cuánto se aporta de agua por cantón, ya que así se podría indicar como distribuir las aguas. Lo propuesto por la comisión es elaborar un plan de solución integral que permita el uso sostenible de los recursos hídricos presentes. Manteniendo un enfoque de ecosistema y ordenamiento territorial. El consejo directivo de la Federación de Heredia, recomendó que los directores del proyecto del plan integral fueran Belén y Flores, ya que ellos son los más damnificados.

La señora Mora advierte que si todos los consejos municipales, como Barva o San Rafael, empiezan a dar permisos de construcción ya no solo sería Belén o Flores, sino todo Heredia empezaría a dar problemas. Esto de acuerdo con el estudio de ICE que establece que no se deben de realizar más desfogues.

Como una medida importante a mencionar, el Proyecto de Saneamiento Ambiental de ESPH, busca, mediante la conexión de las aguas negras, disminuir la cantidad de agua contaminada a desfogar. Pero no contempla a toda la cuenca, solo abarca a personas inscritas a ESPH. Se espera unir fuerzas con la federación de las municipalidades para que sea un proyecto regional, y pueda incluir a más población de Heredia.

4.6 Entrevista CIEDES

Esta entrevista fue realizada al Ingeniero Rafael Oreamuno, con el objetivo de investigar la propuesta que el CIEDES está realizando a municipalidades de Heredia, para así no repetir esfuerzos y colaborar con su investigación.

Oreamuno opina que, más que saber el impacto de la impermeabilización a través de los años, la identificación de cómo van a aumentar los caudales en escenarios futuros, da un punto de referencia importante para la investigación realizadas por la institución.

CIEDES, con el estudio, quiere mostrar como este es un problema complejo y requiere intervención a largo plazo. Su objetivo primordial es la cuantificación del problema, el saber cuánta agua produce cada cantón de la esorrentía total. Para ello el CIEDES va a levantar secciones transversales en las zonas que no se tengan información, y replantear

algunas que ya se han realizado. San Joaquín de Flores, por ejemplo, no tiene secciones de puentes levantadas.

El CIEDES planea realizar un plan de desarrollo para que las municipalidades puedan solicitar dinero para una obra de protección. Además, se tendrán los lineamientos de cómo se va a desarrollar las zonas propuestas.

Oreamuno ve el modelo de escenario futuro de la presente investigación como una propuesta adecuada para unirse a las soluciones y medidas correccionales que salgan de la investigación del CIEDES. Además, establece que con el estudio hidrológico propuesto se podría tener con antelación el diagnóstico de la cuenca, además de comparar los puntos críticos analizados ahora, con los parámetros que se tendrán en un futuro.

4.7 Conclusiones de las entrevistas

Se puede observar que la problemática requiere de una solución basada en la gestión de recursos hídricos, donde se promulgue la participación de todos los actores de la zona, desde los que viven en ella hasta los entes gubernamentales.

Las inundaciones han sido producto de una centralización de las principales ciudades dentro de la cuenca, provocando aumento de suelo impermeable por toda la cuenca. Falta de proyección del crecimiento urbano en años anteriores provocó el no contar con adecuadas políticas o lineamientos para lograr un control de la impermeabilización de la zona.

Así pues, hay un aspecto político y social a tomar en cuenta, en esta línea se ve el papel de la Sala Cuarta como ente político superior que debe solicitar a las municipalidades acciones sostenibles con el medio ambiente mediante una propuesta integral para el manejo de recursos hídricos en la zona.

La comisión del voto 4050 es un gran comienzo para la solución del problema, pero sus esfuerzos han sido desaprovechados por la falta de toma de acciones en concreto. Con base en los informes de reunión, se concluye que pocas decisiones o conclusiones logradas por la comisión han sido realizadas.

Por otro lado, se puede destacar de las entrevistas que, si bien existe un deseo por solucionar el problema, tal como se evidencia mediante la utilización de estudios y de metodologías de propuestas, se nota una discrepancia o falta de trabajo multidisciplinario en la zona.

Asimismo, se demuestra falta de cooperación entre las municipalidades, debido a que la principal necesidad o interrogante es saber cuánto caudal aporta cada municipalidad a la cuenca. Por tanto, se hace evidente la necesidad de un estudio hidrológico para aclarar dudas, también para la toma de decisiones. Además de la necesidad de una simulación que logre proyectar a futuro escenarios para facilitar la creación de políticas necesarias y adecuadas a la zona.

El presente trabajo se ajustaría a esas necesidades, aunque solo abarque la parte hidrológica. Este estudio podrá ser tomado como base para un análisis hidráulico. Además, al ser una investigación de Universidad de Costa Rica, logrará presentar la objetividad que requieren las municipalidades; al evaluar algunas de las medidas propuestas por las municipalidades, estas tendrán un aporte al marco de referencia que necesiten cuando una empresa quiera realizar un proyecto urbanístico y deba presentar el estudio hidrológico para la evacuación de sus aguas.

Una vez respondida esta pregunta, cada municipalidad planea disminuir esta cantidad de caudal mediante un plan realizado individualmente. La investigación planeada por el CIEDES pretende calcular estos caudales para cumplimiento del contrato acordado. El estudio propuesto por esta investigación logrará complementarse con la investigación del CIEDES, dado que adelantará la evaluación de las condiciones actuales de la cuenca. Asimismo, el escenario futuro dará lineamientos a tomar en cuenta para la segunda fase, donde se elaborarán lineamientos o remediaciones para la cuenca.

Capítulo 5. Cambios en el uso de suelo

La delimitación de la cuenca fue generada mediante la extensión ARC-HYDRO, la cual, utiliza las curvas nivel cada 10 metros y la capa de ríos de la zona, esta misma delimitación será la utilizada para la modelación hidrológica. Para realizar un mejor procesamiento de las imágenes satelitales, se recortó el área de la cuenca de las imágenes para realizar más rápidamente los procesamientos en el programa ARCMAP.

Primeramente, a las imágenes satelitales se les realizó una georeferenciación para asignar el sistema de proyecciones oficial CRTM05. Las tres imágenes de 2001, 2008 y 2012 contaban con el mismo datum, se utilizó los mismos puntos de control. Se realizaron 8 puntos de control para una ecuación de primer orden, logrando así un RMS ponderado menor a 10 unidades en las tres imágenes. Para su visualización de las imágenes Landsat 7 ETM+ requiere utilizar configuraciones para asignar los colores rojo, azul y verde a alguna de las bandas. Mediante la asignación u órdenes de bandas se puede lograr diferentes visualizaciones para análisis. Se utilizaron las configuraciones de bandas 3, 2, y 1 y las bandas 4, 5 y 7. Cabe mencionar que para la generación de las clases, el comando utiliza todas las clases asociadas a la imagen, no solo las seleccionadas para la visualización.

Ya que la configuración de bandas 3, 2 y 1, mejor conocida como color natural, permite observar los colores a los que el ojo humano ve los objetos, así que podemos observar claramente en la Figura 8 como la vegetación sana tiene colores verdes, verde-amarillo, los edificios de colores blancos o rojizos y el suelo descubierto tonalidades amarillo oscuro. Cabe destacar que esta clase es difícil de identificar debido a la semejanza con otros colores. Además, como se puede observar en la Figura 9 la configuración de las bandas 4, 5 y 7 ayuda a diferenciar mejor diferentes zonas de vegetación. Mediante ella se pueden diferenciar los cultivos de los bosques, ya que son visualizados en tonalidades rojas. También se puede mencionar el color marrón que es para vegetación abundante; amarillo para mostrar que hay menos vegetación.

La configuración de bandas 4, 5 y 7 ayuda a diferenciar zona urbana de suelo descubierto cuando, en algunas ocasiones, estos tienen tonalidades semejantes al color natural. Esto se observa mediante las tonalidades azul a morado para urbano y tonalidades rosa para suelo descubierto. Por ejemplo, comparando las Figuras 8 y 9 vemos como con la configuración de las bandas 4, 5 y 7 se aprecia mejor la autopista General Cañas. Por último, a la imagen satelital a color verdadero y a la de color con las bandas 4, 5 y 7, se le realizó una verificación mediante orthofotos para así comparar y determinar que las muestras de los píxeles clasificados concuerdan entre sí y asemejan a la realidad.

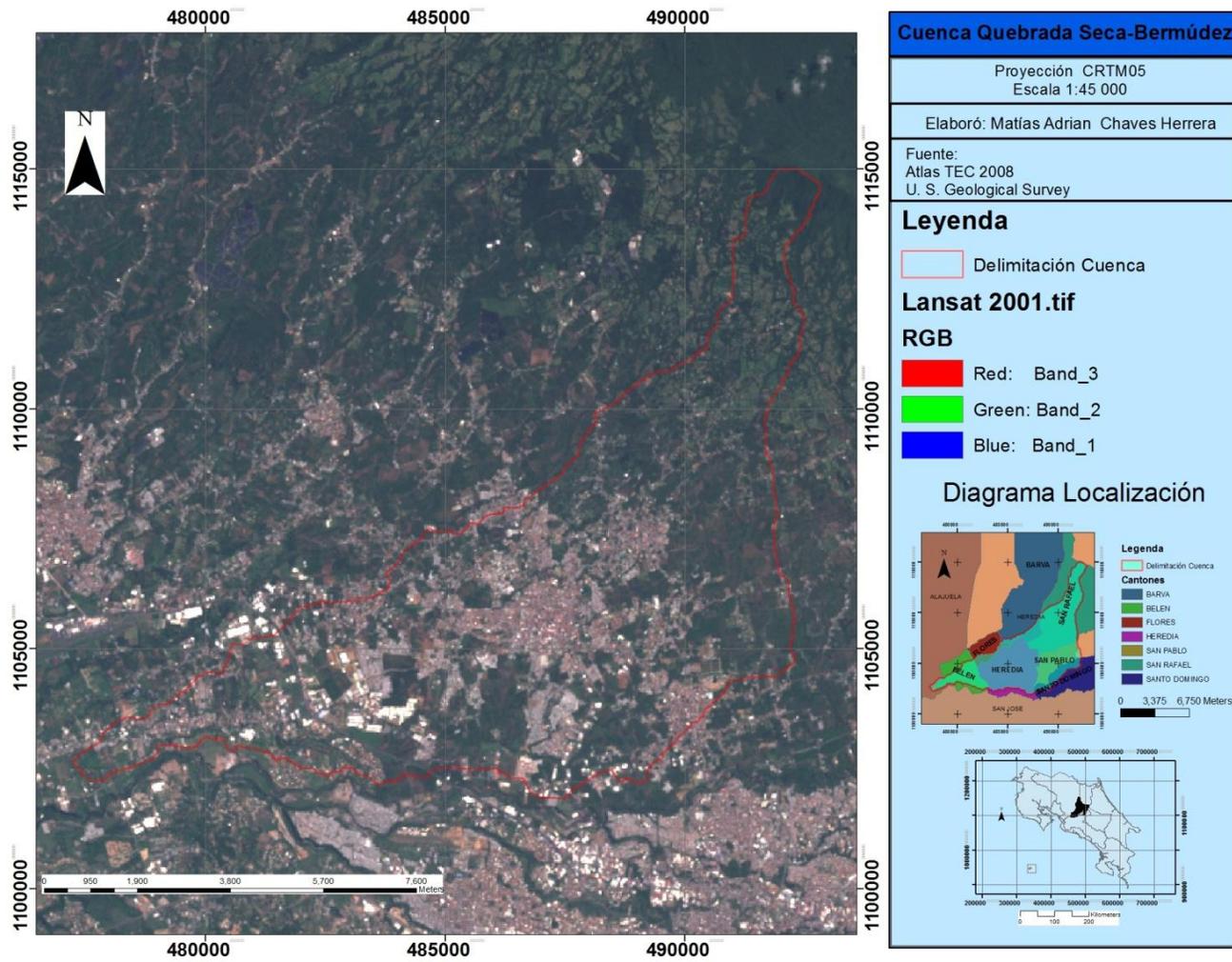


Figura 8. Imagen Lansat 7 ETM+ 2001 en color natural.

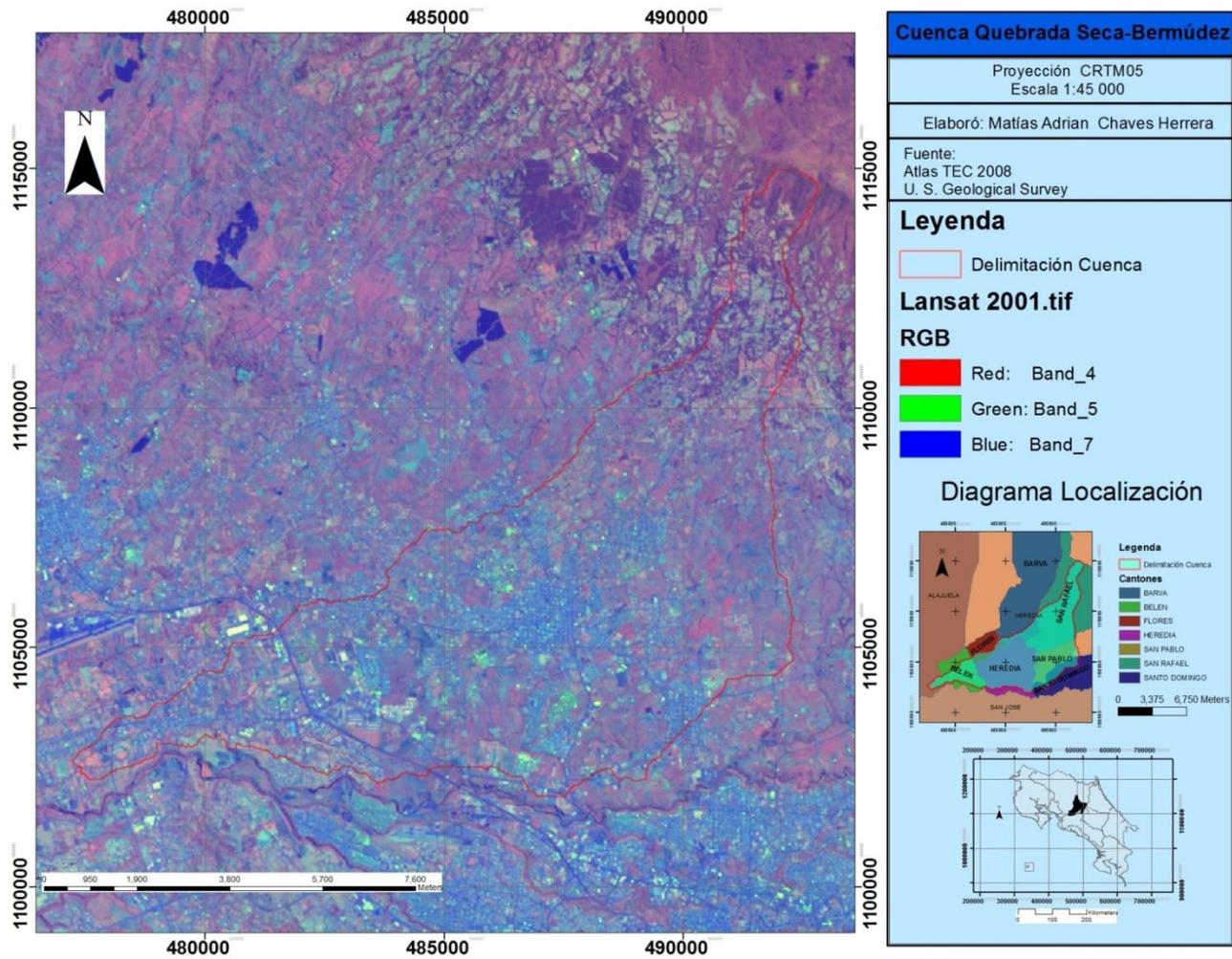


Figura 9. Imagen Lansat 2001 en color de bandas 457.

Las clasificaciones fueron obtenidas mediante la metodología de clasificación supervisada y no supervisada. Se escogió 6 categorías para la clasificación: bosque, pasto, cultivo, suelo descubierto, industria y urbano. Estas categorías representan generalmente el uso de los suelos en la zona.

En otros estudios se utilizan más clases (Masís & Vargas, 2011), como lo son pasto con arbusto, residencial con jardín, bosque secundario, cultivo sin tratamiento, charral, entre otras, sin embargo, dada la finalidad del estudio y la similitud de estas clasificaciones a nivel hidrológico, se procede a agrupar este tipo de clasificaciones en las clases generales antes mencionadas.

Las clasificaciones supervisada y no supervisada demostraron ser muy semejante entre ellas. La cantidad de área total para cada clase está generalmente diferenciada entre 2 y 7 km² siendo la diferencia más significativa la de 9 km² que ocurrió en la clasificación tipo cultivo. En cuanto a lo urbano, hubo diferencias de 7 y 8 km² para los años 2001 y 2008, pero para 2012 mostraron una diferencia de solo 1.1 km².

Se determina que la clasificación supervisada va a depender del tipo de muestra, por lo tanto, se requiere hacer muchas muestras para representar la clase, no obstante, debido a que en la muestra puede que se hayan incluido varios tipos de longitud de onda energética emitidas al pixel, puede ser que la señal esté mezclada y que no se haya tomado muestra representativa y la clasificación no sea la correcta.

Para observar la efectividad de las clasificaciones se solicitó al programa un histograma que muestra clases contra los tipos de bandas a las 3 imágenes satelitales, mediante el histograma observamos cómo los distintos pixeles pueden ser agrupados de distinta manera por la banda escogida. Esto nos permite ver los traslapes entre clases y determinar si requerimos otros medios para determinar si la clasificación es efectiva.

Observando los histogramas en la Figura 10, se observa que el color rojo es clase urbana, gris la industria, verde oscuro el bosque, verde claro cultivos, verde fluorescente pasto y amarillo suelo descubierto; se observa que sí existe un traslape entre las clases.

Se procede entonces a determinar este error de clasificación mediante una matriz de confusión a la imagen Landsat del 2008. Se puede observar de la Tabla 11 y la Tabla 12 los 30 puntos que lograron caer en la asignación que correspondían. Seguidamente, se compararon los puntos de control contra las clases y se obtuvo un porcentaje general de 91% y un kappa de 0.89 (siendo un kappa de 1 una asignación perfecta) para ambas clasificaciones. Por lo que se nos determina que ambas clasificaciones son adecuadas.

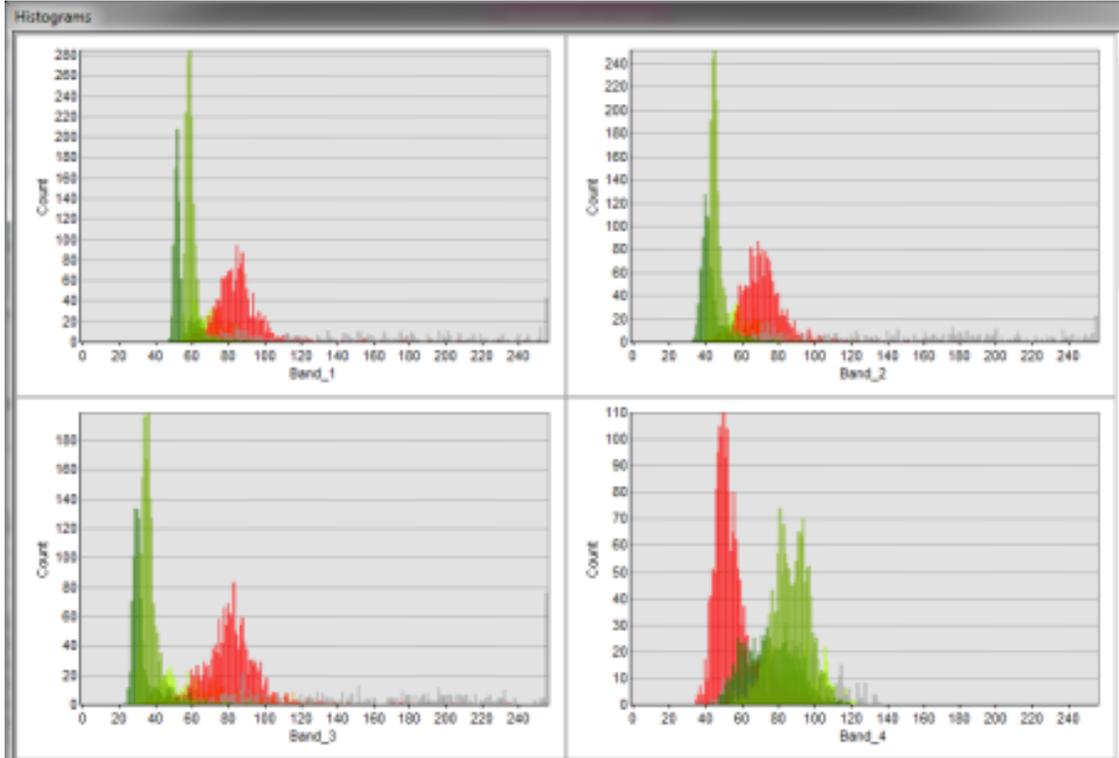


Figura 10. Histograma de clases contra las 4 primeras bandas, Fuente: Imagen 2008.

Tabla 11. Matriz de confusión para clasificación supervisada, Imagen Lansat 2012.

Clases		Asignadas					
		Bosque	Cultivo	Pasto	Suelo Descubierta	Urbano	Industria
Reales	Bosque	24	1	0	0	0	0
	Cultivo	3	29	0	0	0	0
	Pasto	0	0	23	0	0	0
	Suelo Descubierta	2	0	0	26	3	0
	Urbano	0	0	0	1	21	0
	Industria	0	0	0	2	4	30

Tabla 12. Matriz de confusión para clasificación no supervisada, Imagen Lansat 2012.

Clases		Asignadas					
		Bosque	Cultivo	Pasto	Suelo Descubierto	Urbano	Industria
Reales	Bosque	24	3	0	2	0	0
	Cultivo	1	29	0	0	0	0
	Pasto	0	0	23	0	0	0
	Suelo Descubierto	0	0	0	26	1	2
	Urbano	0	0	0	3	21	4
	Industria	0	0	0	0	0	30

Determinados los errores de clasificación, se procede a realizar una comparación entre ellos para encontrar la mejor clasificación. Analizando los cambios debido a la temporalidad de las imágenes, se observa que en ambos hay un comportamiento a esperar, no obstante, en el método supervisado para la clase urbana entre los años 2008 y 2012 existe una disminución de 1.8 km². Esta disminución no es esperada para una ciudad que está en proceso de crecimiento. Esta situación no sucede para la clasificación no supervisada, en la cual sí se ve un cambio de 7.1 km² entre los años 2008 y 2012. Posiblemente, la agrupación de las 16 clases seleccionadas para clasificación resultó ser más precisa que la metodología supervisada de firmas espectrales para este caso.

Por lo tanto, es más adecuada la clasificación no supervisada debido a que la agrupación de los pixeles semejantes entre ellos resulta ser más eficaz en estos casos. Consecuentemente se escoge esta clasificación para la posterior asignación del número de curva. El análisis estadístico se realizó tanto a escala de la cuenca como a escala cantonal, es decir, a obtener el uso de suelo que contiene cada cantón. Los porcentajes de uso se presentan a continuación en las Tabla 13 y Tabla 14, cada una divididas en cada año estudiado.

Al observar la Tabla 14 en la clasificación de uso urbano vemos la tendencia de crecimiento esperada para una cuenca urbana, pasando de 28% en el 2001 a 32% en el 2008 y terminando en 34% para el 2012. El uso de industria tiene en el 2001 un 5%, en los dos años 2001 y 2008 se tiene un 7% y 9% respectivamente. Ambas clasificaciones de suelo impermeable presentan un crecimiento constante.

Para la categoría de uso “Cultivo” este se obtuvo un drástico descenso entre los años 2001 y 2008 con un decrecimiento de casi 10%. Para la categoría del “Bosque” se mantiene en

valores relativamente cercanos entre 6% para el 2001, 9% para el 2008 y 7% para 2012. “Pasto” por su parte también presenta una disminución a travez de los años pasando de 12%, a 8% y 5%; para la categoría de “Suelo Descubierta” cabe destacar un crecimiento-decrecimiento, esto debido a la dinámica de estos usos generados por la actividad humana (Figura 11).

Analizando los cambios de área entre los años (Tabla 15), vemos que el suelo descubierta para el 2008 presentó un aumento de 2%, seguido de una disminución de 31%, pasto y cultivo disminuyeron un 39%, esto posiblemente debido manejo de los cultivos y su transformación a uso urbano. En cuanto a industria/comercio vemos como aumenta para el 2012 un crecimiento de 30%. Partiendo del 2001 y para 2012 el área urbana aumento un 29%, probablemente debido al desarrollo de varios complejos urbanísticos.

Al ver el cambio de 2001 a 2012 se observa una tendencia lógica de disminución de suelo permeable (bosque, cultivo, pasto y suelo descubierta), de igual forma se tiene un claro crecimiento de suelo impermeable (industria y urbano); cabe aclarar que suelo descubierta presenta aumento, indicando transición de uso suelo a otro tipo de uso.

Tabla 13. Tipos de uso de suelo mediante método supervisado.

Uso de suelo	Supervisado					
	2001		2008		2012	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Bosque	3.7	5%	4.8	7%	5.5	8%
Pasto	21.1	29%	15	21%	13.3	18%
Cultivo	3.5	5%	3.9	5%	4.1	6%
Suelo descubierta	6.5	9%	8.8	12%	8.9	12%
Industria/Comercio	4.8	7%	9.1	13%	19.7	27%
Urbano	32.4	45%	29.4	41%	20.4	28%
Nubes y sombra	0	0%	1.4	2%	0	0%
Total	71.942	100%	71.9	100%	71.9	100%

Tabla 14. Tipos de uso de suelo mediante método no supervisado.

Uso de suelo	No supervisado					
	2001		2008		2012	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Bosque	6.4	9%	8.12	11%	5.6	8%
Pasto	9.3	13%	5.73	8%	7.48	10%
Cultivo	13.6	19%	8.34	12%	11.35	16%
Suelo descubierto	17.7	25%	18.09	25%	13.97	19%
Industria/Comercio	3.2	4%	3.25	5%	5.46	8%
Urbano	21.7	30%	27.49	38%	28.05	39%
Nubes y sombra	0	0%	0.9	1%	0	0%
Total	71.919	100%	71.9	100%	71.9	100%

Tabla 15. Porcentaje de la tasa de cambio.

	2001-2008	2008-2012	2001-2012
Bosque	27%	-31%	-13%
Pasto	-39%	31%	-20%
Cultivo	-39%	36%	-16%
Suelo descubierto	2%	-23%	-21%
Industria/Comercio	1%	68%	70%
Urbano	27%	2%	29%

Se realizó visitas al lugar estudiado, en las zonas o lugares en que se tenía la incertidumbre si en realidad pertenecían a la clase seleccionada, se referenció espacialmente el lugar en que se tomó la foto. Además, mediante esta visita se logra tener una mejor apreciación de los usos de suelo y se tiene una mejor caracterización de las condiciones actuales en la cuenca. Se puede ver de la Tabla 16 , la descripción y localización de los lugares a los

cuales se realizó la visita y en la Figura 12 una visión de la localización de los lugares mediante el programa Google Earth.

Para uso de Bosque se visitó la zona norte de San Rafael, en ella se observa un bosque lluvioso característico de montaña, con alta humedad, materia orgánica en el suelo. Cabe destacar la intervención humana en el lugar para ir desplazando el Bosque para dar cabida a lotes en venta y restaurantes.

Para la categoría de “Cultivo” se comprueba la predominancia de café, en cuanto a “Suelo Descubierta” se nota paulatinamente en la zona a conforme se realizaba el recorrido. De igual forma el “Pasto” aparecía en estratos de la zona, aunque cabe destacar su predominancia en la zona alta, a la par de complejos urbanos.

Una clara zona Urbana se aprecia en la zona baja y media de la cuenca, su concentración de casas o área impermeable aumentaba conforme se descendía en la cuenca. La zona Industrial mostraba su crecimiento y desarrollo en la parte sur-oeste. Adjunto a recolección de datos de uso de suelo se realizó una inspección de los ríos Quebrada Seca y Bermúdez. En las fotografías vemos como los caudales fuertes han desprendido estructuras de protección y margen del río.

La capacidad y los márgenes de los ríos principales (Tabla 16), también se inspeccionaron, en ellas vemos la capacidad volumétrica aguas abajo de la cuenca. Se aprecia la altura de los márgenes del río Bermúdez y la capacidad de Quebrada Seca

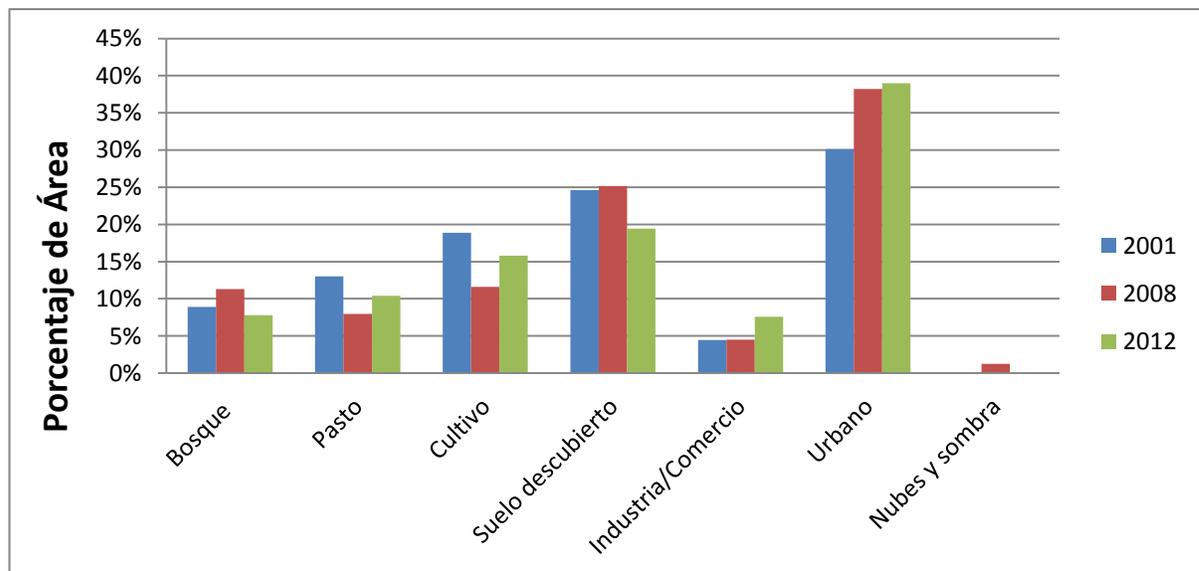


Figura 11. Porcentaje de área de las clases, clasificación no supervisada.

Tabla 16. Fotografías área de estudio, 21 de noviembre de 2013.

Descripción y localización geográfica	Fotografía	
<p>Uso Bosque, zona alta de la cuenca.</p> <p>+10°2'49.86,-84°5'8.56</p>		
<p>Uso Cultivo, zona media de la cuenca.</p> <p>+10°1'20.02,-84°6'32.19</p> <p>+10°0'8.24, -84°5'26.01</p>		
<p>Uso Suelo Descubierto, Zona alta y media de la cuenca.</p> <p>+10°0'14.40,-84°7'26.17</p> <p>+10°0'58.67, -84°6'2.45</p>		
<p>Uso Pasto, zona alta y baja de la cuenca.</p> <p>+10°2'24.22,-84°5'39.03</p> <p>+10°0'0.20, -84°8'58.10</p>		

<p>Uso Urbano zona media y alta de la cuenca.</p> <p>+10°0'14.35,-84°7'26.04</p> <p>+10°0'4.69, -84°5'14.35</p>		
<p>Uso Industrial y comercial, zona media y baja de la cuenca.</p> <p>+9°59'24.34,-84°10'16.5</p> <p>+9°58'49.3,-84°11'12.01</p>		
<p>Identificación de invasión al margen del río y socavación de este.</p> <p>+9°58'49.30, -84°11'12</p> <p>+9°58'52.25, -84°10'57</p>		
<p>Capacidad y márgenes de Quebrada Seca y río Bermúdez, en la parte baja de la cuenca.</p> <p>+9°58'16.22, -84°8'59.79</p> <p>9.971172°, -84.149942°</p>		

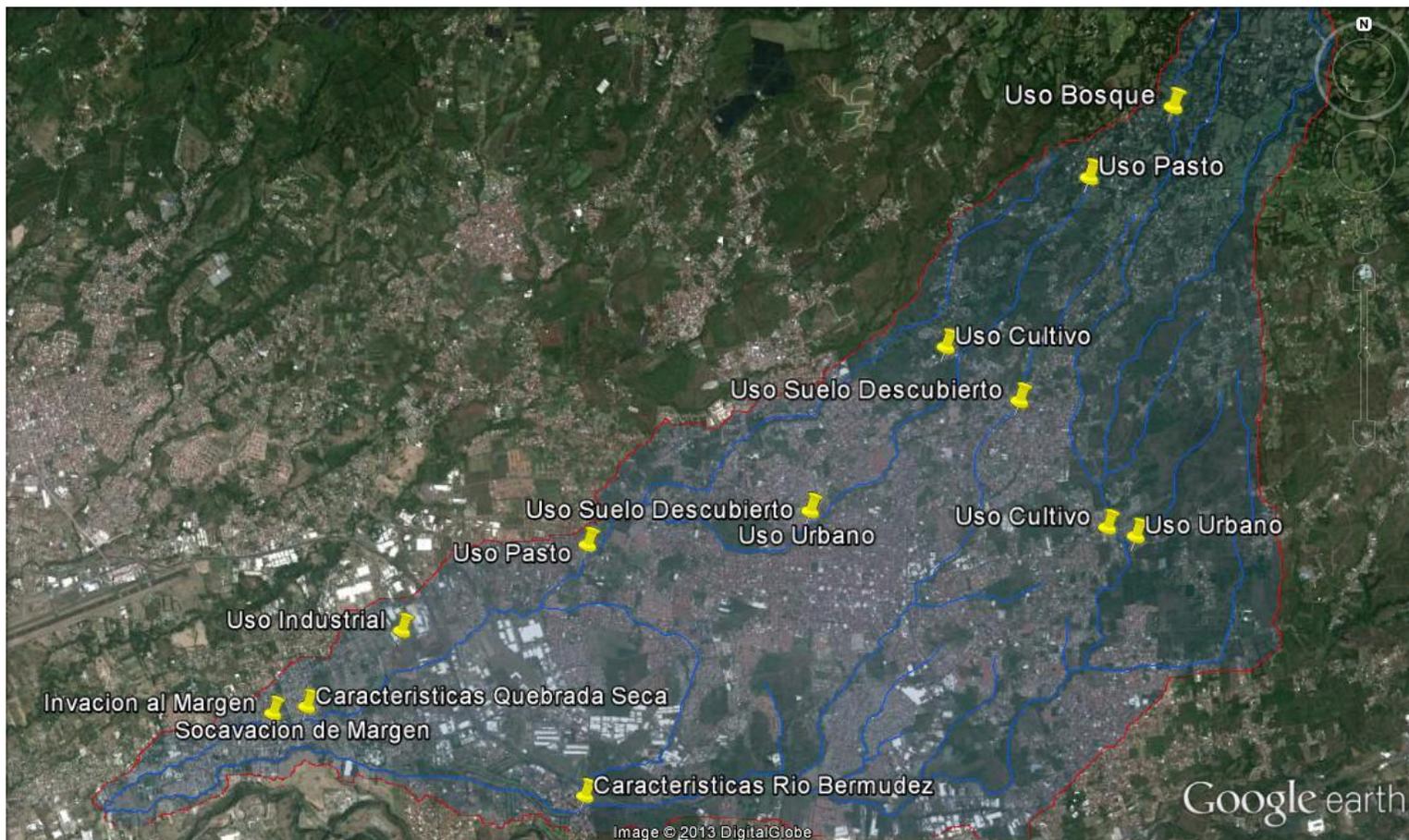


Figura 12. Localización de la fotografías. Fuente: Google Earth.

5.1 Análisis espacio temporal de los escenarios pasados

5.1.1 Análisis año 2001

Una característica importante de este año es que, según la investigación histórica relacionada con las inundaciones, fue en estas fechas en que se comenzó a presentar problemas de inundación en la parte baja de la cuenca.

Mediante la Figura 15 vemos como la predominancia es un suelo permeable y como los centros urbanos se extiende en dirección a la parte alta de la cuenca, allí la predominancia es suelo permeable principalmente pasto. Se aprecian sobresalientes sectores de suelo permeable en la parte baja y media de la cuenca donde el uso urbano se nota predominantemente.

A nivel cantonal, se obtiene que Heredia ser la zona de mayor área en la cuenca, y la que aporta el mayor porcentaje de uso urbano; por otro lado, San Rafael es el cantón que aporta mayor porcentaje de cobertura vegetal y suelo descubierto.

A como se puede observar de los valores obtenidos de la clasificación no supervisada (Tabla 17), el mayor porcentaje de área fue la urbana lo tiene Flores con un 48 % seguido de Heredia con un 42% y 6.4 km². Esta área es casi el área de aporte urbano de 4 cantones, entre ellos el tercer cantón más urbanizado, Belén. La mayor cobertura vegetal tipo cultivo la tiene San Rafael con un 29 % y San Isidro con un 27%.

A nivel de cantón el mayor porcentaje de suelo descubierto lo presentan San Isidro 43% y Flores con un 33%. dea de quien tiene las condiciones más óptimas de uso de suelo. El área impermeable (uso urbano e industrial) es superior a 30 % en 6 cantones, y 51% en 2 cantones. Estos porcentajes de impermeabilización generaban problemas de inundación y varios de los puentes estaban alcanzando su capacidad máxima de caudal.

Realizando un resumen de suelo permeable (bosque, pasto y suelo descubierto) y no permeable (uso urbano e industrial) en la Tabla 18. Vemos como el suelo permeable impera sobre el impermeable por casi el doble. Hay un 65 % para el conjunto suelo permeable constituido por bosque, cultivo, pasto y suelo descubierto; mientras que, para suelo impermeable compuesto por industria y urbano, se tiene un 35%.

Se muestra en la Figura 14 los valores en porcentaje suelo impermeable por cantón, donde se puede observar como Flores y Heredia comparten la mismo porcentaje de cobertura de suelo impermeable 51%, Belén semejante a los anteriores con 43%, a excepción de San

Rafael y San Isidro que no llegan al 20 % de cobertura impermeable, los demás cantones están entre un 30% a 36% de cobertura no permeable. Por otro lado, para observar mejor el porcentaje de usos a nivel cantonal se presenta el gráfico de la Figura 13 donde se muestran los distintos usos por cantón en donde en algunos casos el uso urbano sobresale de los otros usos.

Tabla 17. Porcentaje de cobertura del suelo, año 2001.

	Uso de Suelo Km ²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
2001	Bosque	0.01	0.05	0.01	0.01	0.05	0.00	0.02	3.94	0.01	4.10
	Cultivo	0.19	1.71	1.52	0.58	5.76	0.27	3.55	9.72	2.05	25.35
	Industria /Comercio	0.05	0.07	0.79	0.09	2.08	0.00	0.25	0.14	0.14	3.61
	Pasto	0.10	0.39	0.97	0.20	1.59	0.05	1.13	3.84	0.61	8.87
	Suelo descubierto	0.10	0.59	1.26	0.45	3.03	0.10	1.37	2.29	0.69	9.87
	Urbano	0.33	0.64	2.64	0.93	10.26	0.08	2.01	2.07	1.14	20.11
	Total	0.78	3.45	7.19	2.26	22.77	0.51	8.33	21.99	4.64	71.91

Tabla 18. Porcentaje de cobertura permeable y no permeable del suelo, año 2001.

Porcentaje de Uso por Cantón	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total área de la cuenca
Permeable	71%	67%	57%	49%	49%	81%	68%	85%	64%	65%
No Permeable	29%	33%	43%	51%	51%	19%	32%	15%	36%	35%

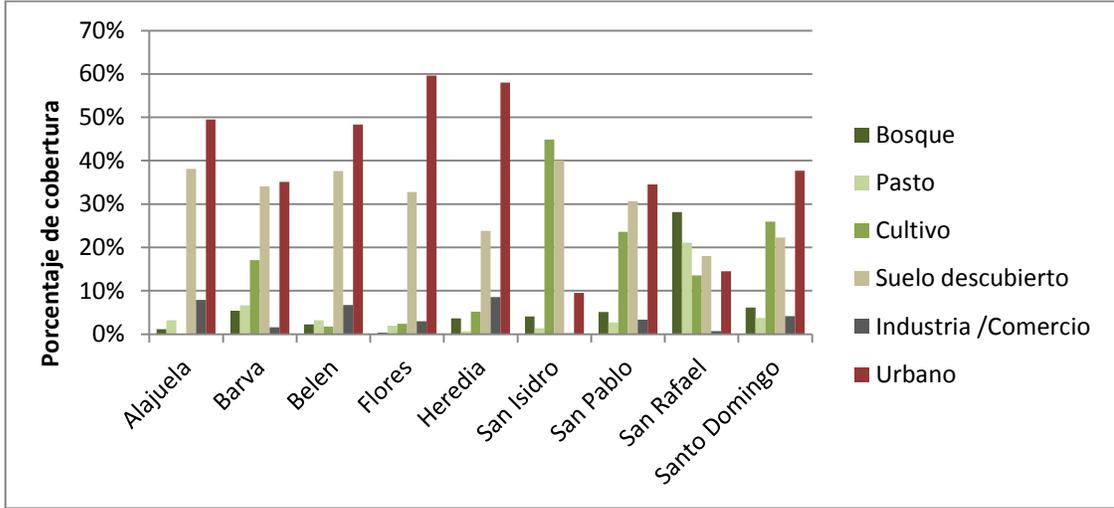


Figura 13. Porcentaje de cobertura del suelo, año 2001.

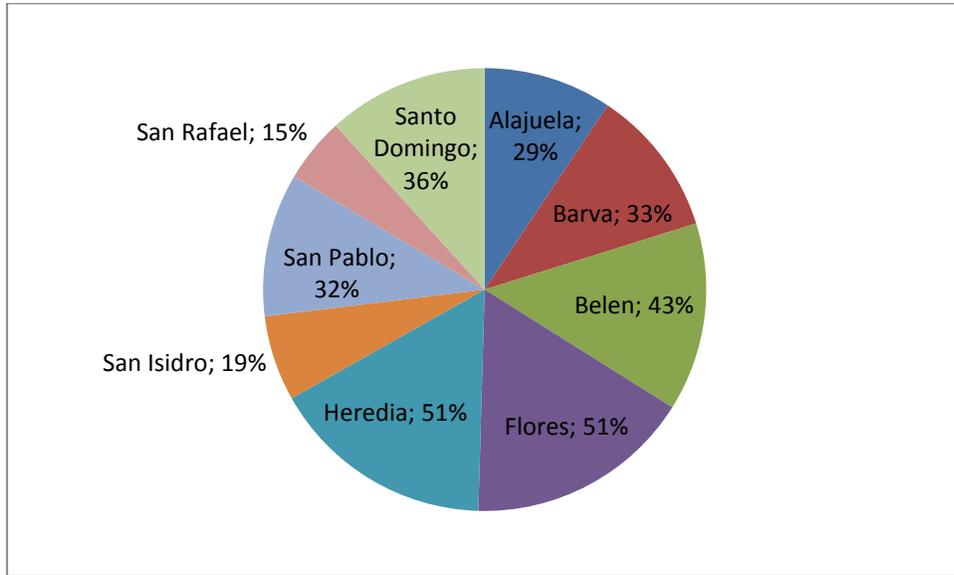


Figura 14. Porcentaje de impermeabilidad por cantón, año 2001.

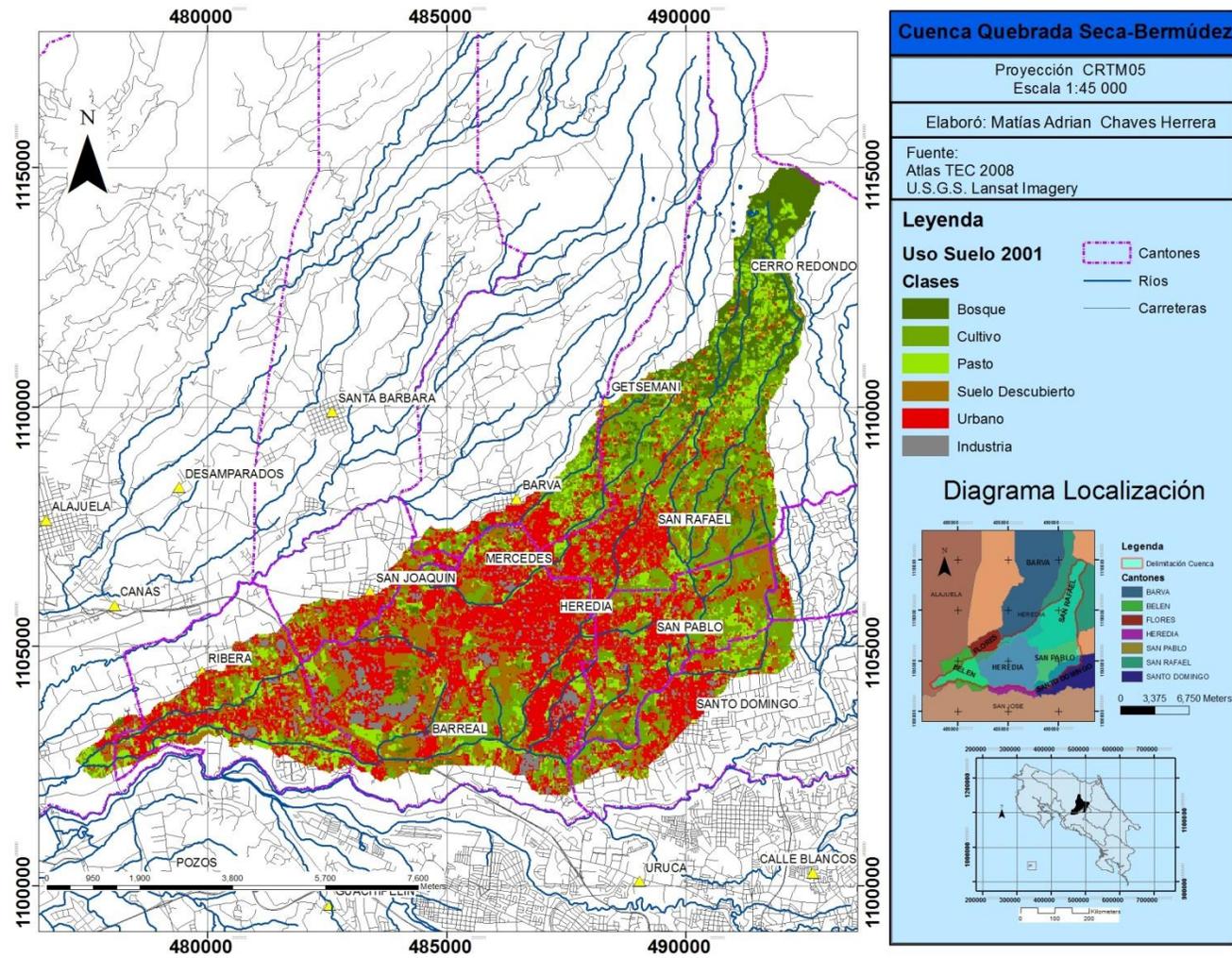


Figura 15. Mapa Uso de Suelo 2001.

5.1.2 Análisis año 2008

Se debe mencionar que este año, mediante el voto 4050 (establecido en el 2005) de la Sala Cuarta, se detuvieron muchos proyectos urbanísticos en la zona. Lo que logró relativamente bajos incrementos urbanísticos a lo largo de Quebrada Seca.

Es importante mencionar que a como se muestra en la Figura 18, este año se presentó una serie de nubes que cubrieron la zona, estas son: una nube que cubre parte del área boscosa en la parte norte de la cuenca y, en la misma zona, otras dos que, con sus sombras reflejadas, cubren áreas de lo que podría ser pasto, cultivo y bosque.

De la Tabla 19, en cuanto a la escala cantonal, San Rafael sigue siendo el que tiene mayor cobertura vegetal pero presenta una disminución de 95% en pasto, de 35% para cultivos y en área urbana un aumento de 39%.

Con respecto al año 2001 (Tabla 19), Heredia tiene un crecimiento porcentual en área urbana de 39% de su área total. Belén y Flores presentaron importantes aumentos en relación al año 2001; se aumentó un 34% y 24 % en el área urbana, teniendo así un área impermeable de 29 % y 22% (Tabla 20) respectivamente. Con estos datos, se colabora la problemática de cobertura impermeable en la parte media y baja de la cuenca para este año que sigue en aumento.

De la Tabla 20 vemos como se genera un crecimiento del uso impermeable, pasando a ser un total de 43% y por lo tanto dejando al uso permeable un 53%. Cabe destacar que Heredia y Flores aumentan considerablemente su zona urbana e industrial.

Así pues, viendo la gráfica de la Figura 16 vemos como el uso urbano domina mayoritariamente en los cantones de la parte baja y media, San Isidro, San Rafael y San Pablo tiene una mayor predominancia de suelo permeable. Al ver la Figura 17 notamos como siguen siendo Heredia y San Joaquín de Flores los cantones con mayor porcentaje de suelo impermeable.

Tabla 19. Porcentaje de cambio de cobertura del suelo, año 2008.

	Uso de Suelo Km²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
2008	Bosque	0.01	0.22	0.01	0.00	0.08	0.00	0.35	5.14	0.31	6.112
	Cultivo	0.02	1.01	0.22	0.13	2.07	0.11	2.11	3.28	1.56	10.50
	Industria /Comercio	0.07	0.12	0.89	0.13	3.00	0.00	0.43	0.28	0.17	5.09
	Pasto	0.02	0.28	0.11	0.04	0.13	0.03	0.20	5.01	0.16	5.98
	Suelo descubierto	0.29	1.17	2.45	0.88	5.70	0.28	2.98	3.75	1.24	18.74
	Urbano	0.37	0.65	3.50	1.09	11.78	0.09	2.26	2.29	1.19	23.21
	Nubes y sombra	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	2.25	0.00	2.28
	Total	0.78	3.45	7.19	2.26	22.77	0.51	8.33	21.99	4.64	71.92

Tabla 20. Porcentaje de área impermeable del suelo, año 2008.

Uso de Suelo	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
Permeable	43%	63%	45%	37%	33%	90%	62%	84%	58%	57%
No Permeable	57%	37%	55%	63%	67%	10%	38%	16%	42%	43%

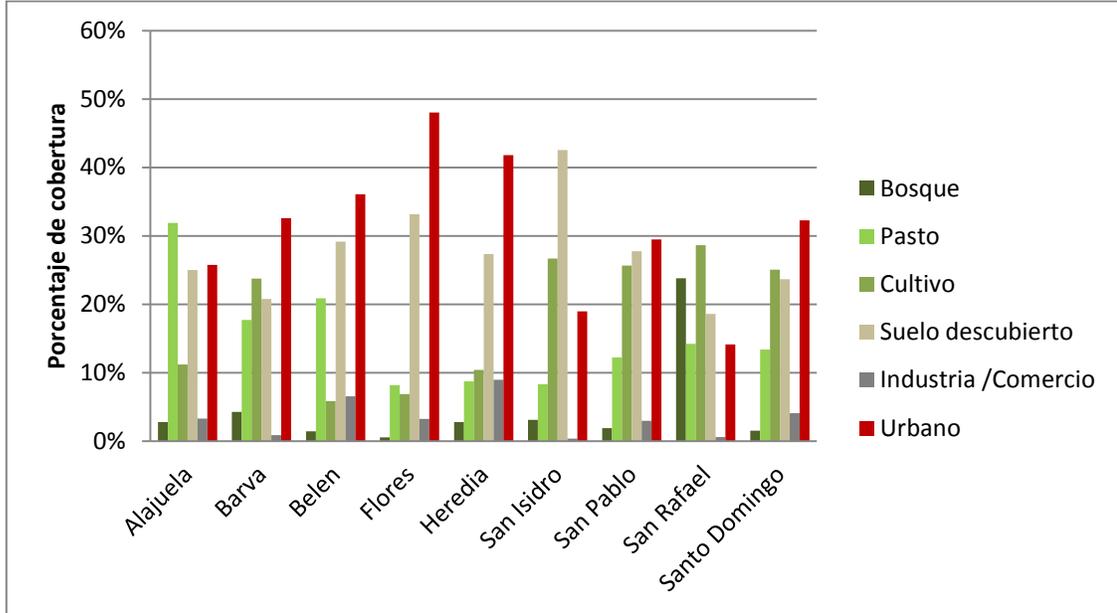


Figura 16. Porcentaje de cobertura por cantón, año 2008.

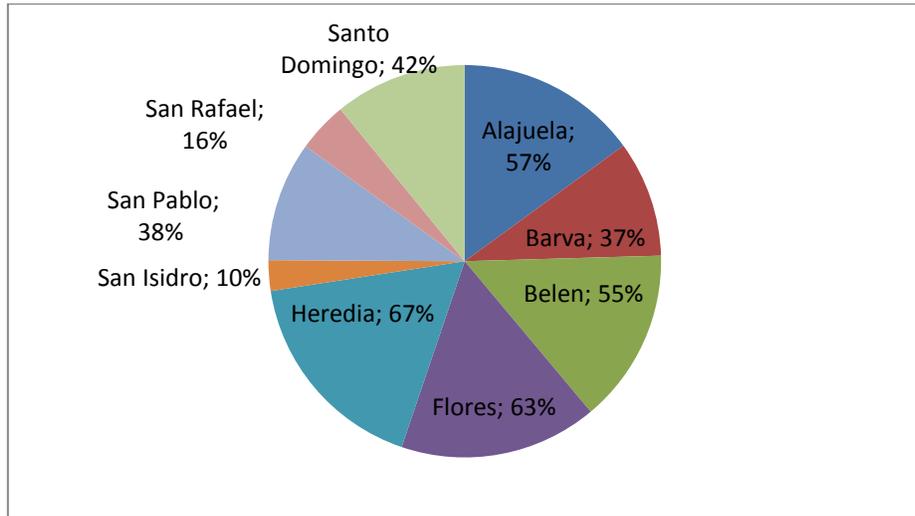


Figura 17. Porcentaje impermeabilización por cantón, año 2008.

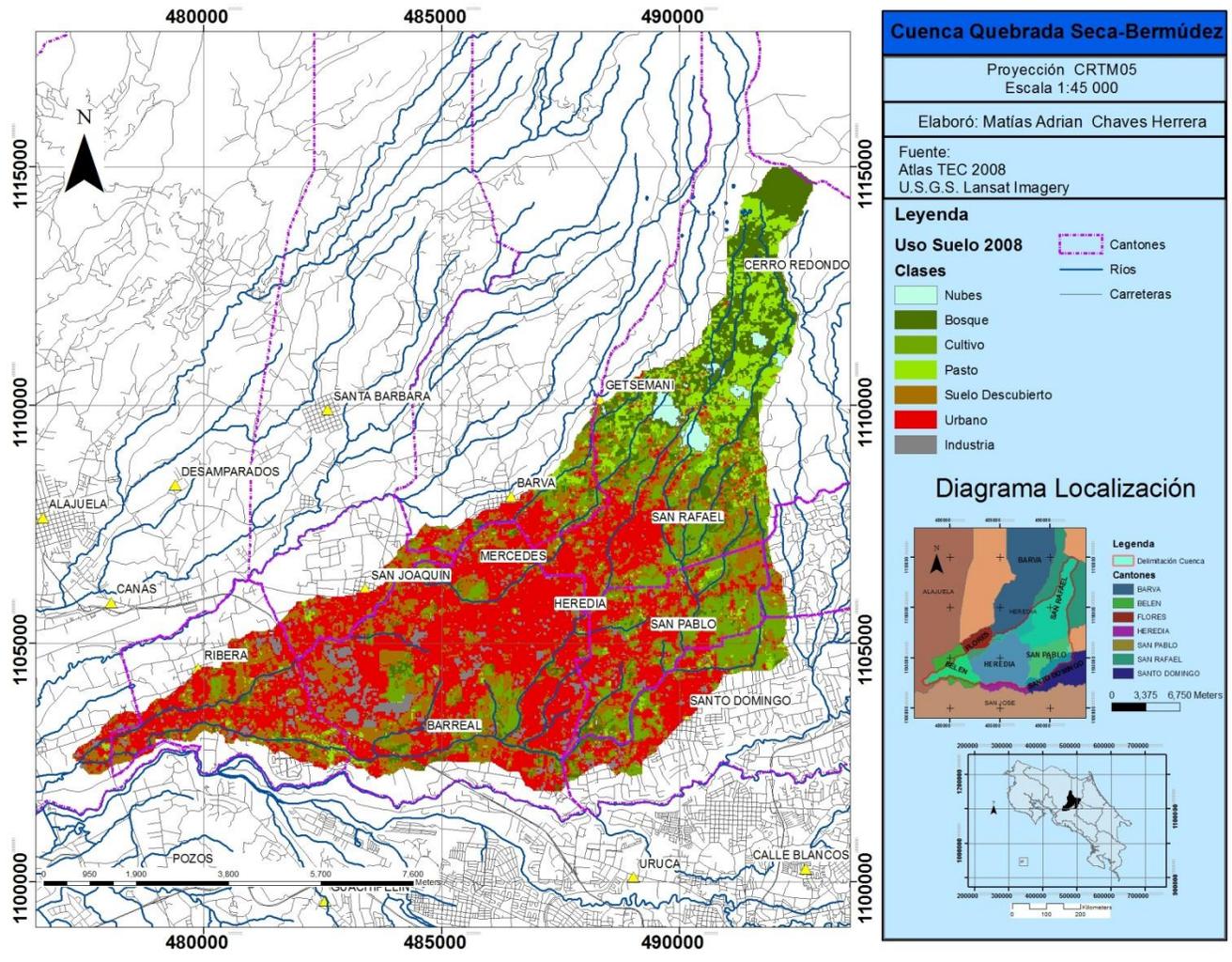


Figura 18. Mapa Uso de Suelo 2008.

5.1.3 Análisis del año 2012

El año 2012 fue un año de cambios significativos, como lo fueron del 2001 al 2008. El bosque disminuyó 2.5 km², el cultivo aumentó en 3 km², el suelo descubierto decreció 4.1 km² y el pasto aumento 1.8 km². En cuanto al uso urbano, este aumento 7.1 km² igual que la industria con 1.6 km². Es importante señalar que, a pesar de seguir en vigencia el voto 4050, se encuentran estos crecimientos importantes de zonas urbanas e industriales en la cuenca Quebrada Seca, donde se impuso esta ley.

Estas nuevas industrias pueden localizarse en Barreal de Heredia y en el distrito la Rivera de Belén, donde se construyeron una serie de complejos pertenecientes a distintas empresas, además como las áreas permeables en la parte baja son más pequeñas. Un aspecto importante a señalar es que estas áreas aunque algunas se encuentran cercanas otras se distancian por un par de kilómetros (Figura 21).

Observando a escala cantonal (Tabla 21), se observa que, una vez más, San Rafael sigue teniendo la mayoría de área en cobertura vegetal, siendo esta de 5 km², teniendo pocos cambios en el porcentaje de área con respecto a años anteriores. Heredia ha cambiado a 12.35 km² en la clase urbana y a 3.14 km² en la clase industria/comercio, por lo que sigue siendo el área con mayor con cobertura urbanística.

Mediante la Tabla 22 logramos ver como para el 2012 la cobertura impermeable aumenta pero no tanto a como lo hizo en el 2008. No obstante se observa que casi tiene igual cantidad de cobertura. Por otro lado al observar la gráfica de la Figura 19 vemos como solo en 2 cantones se tiene mayor cobertura permeable que es San Isidro y San Rafael.

Zona urbana e industrias catalogadas como áreas impermeables, tienen su mayor porcentaje de cobertura en los cantones más desarrollados como Heredia, Belén y Flores (Figura 20 y Tabla 22); porcentajes de 68%, 60% y 63% respectivamente. Cabe mencionar que Flores ha tenido un proceso de industrialización en su área de aporte a la cuenca debido a modificaciones importantes que se desarrollaron en la zona que limita con Belén, entre ellas, arreglos en la carretera que los comunica y la instalación de nuevos comercios.

Analizando los incrementos del año 2008 a 2012 observamos de la Tabla 21 que los distritos de Belén, Flores y Heredia sufren incrementos esperados en suelo urbano e industrial. Pero es San Isidro el que presenta los mayores cambios, principalmente de tipo industria.

Tabla 21. Área de cobertura del suelo, año 2012.

	Uso de Suelo Km ²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
2012	Bosque	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.14	4.93	0.07	5.206
	Cultivo	0.01	0.72	0.09	0.05	1.45	0.12	2.18	4.78	1.46	10.85
	Industria /Comercio	0.20	0.16	1.39	0.19	3.55	0.01	0.59	0.39	0.29	6.76
	Pasto	0.00	0.16	0.04	0.01	0.09	0.01	0.12	3.04	0.15	3.62
	Suelo descubierto	0.15	1.33	1.59	0.44	3.62	0.22	2.12	4.88	1.00	15.35
	Urbano	0.40	1.07	4.09	1.57	14.03	0.15	3.18	3.97	1.66	30.13
	Total	0.78	3.45	7.19	2.26	22.77	0.51	8.33	21.99	4.64	71.92

Tabla 22. Área impermeable del suelo, año 2012.

Porcentaje de Uso por Cantón	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
Permeable	45%	56%	40%	37%	32%	79%	60%	82%	51%	54%
No Permeable	55%	44%	60%	63%	68%	21%	40%	22%	49%	47%

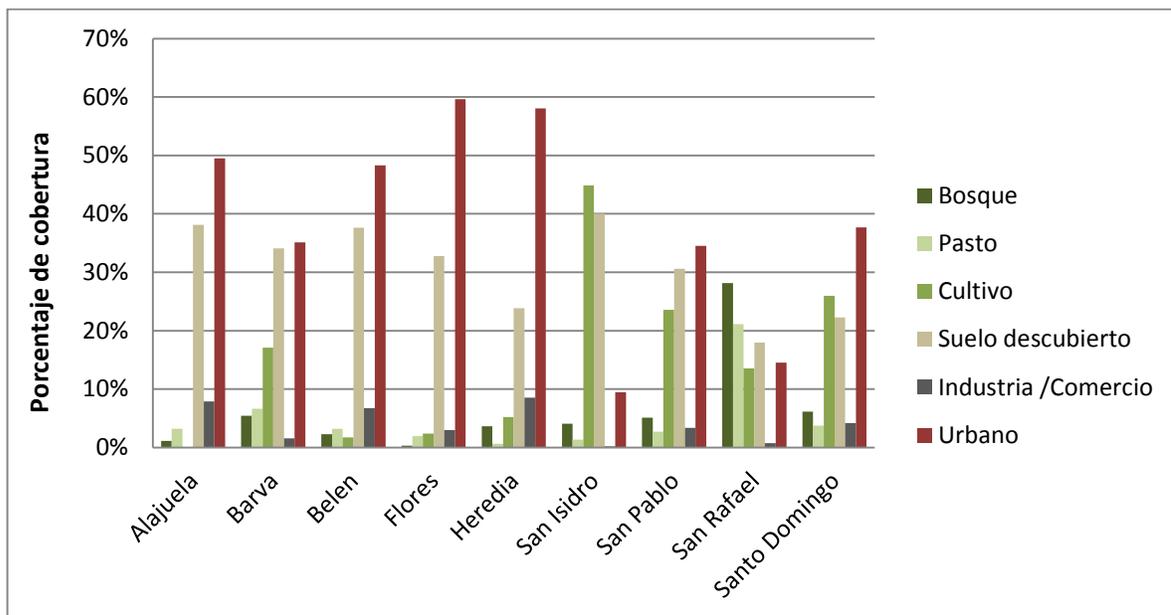


Figura 19. Porcentaje de uso de suelo por cantón, año 2012.

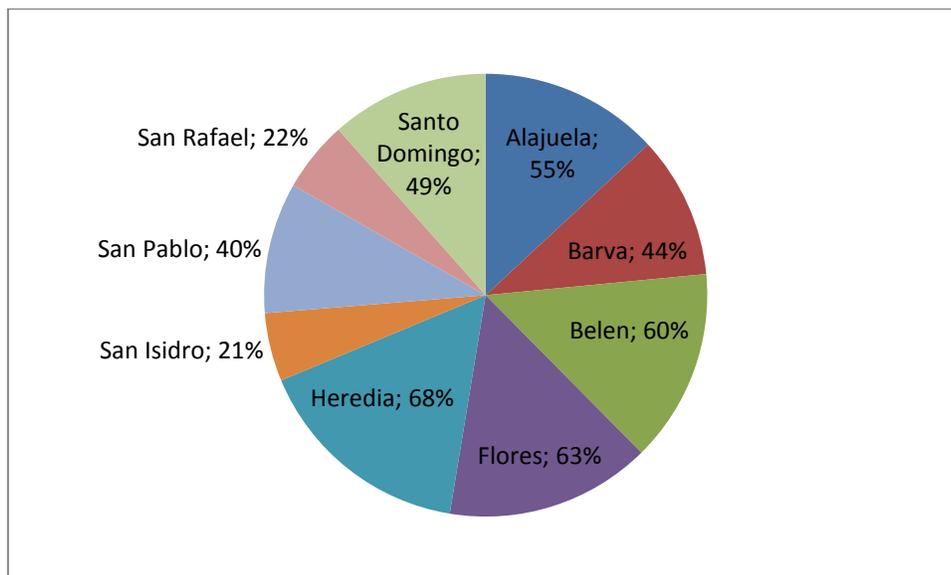


Figura 20. Porcentaje impermeabilización por cantón, año 2012.

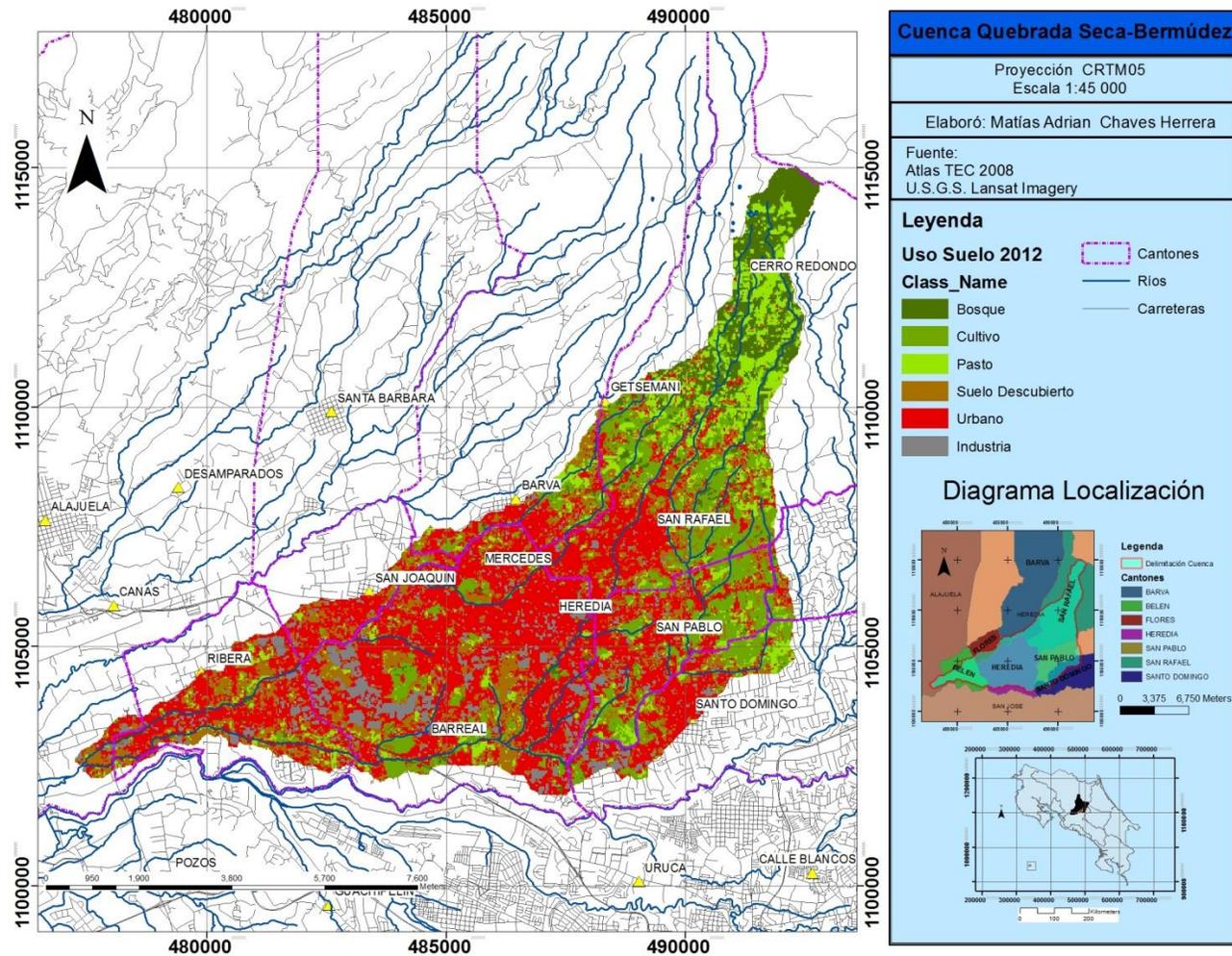


Figura 21. Mapa Uso de Suelo 2012.

5.2 Escenarios futuros

5.2.1 Primer escenario

El primero escenario es calculado mediante ecuaciones polinómicas y/o logarítmicas que determinan una tendencia basada en los datos de crecimiento urbano en los años 2001, 2008 y 2012. Mediante la ecuación se extrapola a 20 años para obtener el área de cobertura del uso urbano e industria, es decir, suelo no permeable para cada cantón (Tabla 23).

No obstante, en algunos caso el área resultante sobrepasaba el área cantonal cuando esto sucedía se dejó el área total de aporte del cantón a la cuenca. Se obtuvo un área no permeable de 42.6 Km² para el 2020, es decir un aumento del 21% con respecto al 2012. El área permeable fue de 29.32 Km².

Se puede observar en la Figura 22 como prácticamente el área central y la zona baja de la cuenca se encuentran totalmente impermeabilizada, aunque existen algunos pixeles todavía en verde que pertenecen a zonas verdes que se mantienen en la zona.

También, aparece una nueva clase urbano/industria, la cual son las áreas nuevas en que podría ser tanto para uso urbano como para industria por lo que se le asigna un numero de curva promediado entre los dos .

Por otra parte, mediante la Tabla 24 se puede mostrar como para los cantones de Heredia, Flores, Belén y Alajuela se sobrepasó el área, por lo que se asignó su respectiva área que aporta a la cuenca. Se observa que San Rafael y San Pablo tendrán un porcentaje alto de urbanización semejante al uso que tenían a sus vecinos cantones en el 2012.

Este escenario propone que no existe restricción en los márgenes de los ríos y que todo lo que antes era pasto, cultivo y suelo descubierto fue urbanizado. En la Figura 22 vemos como el bosque en la parte alta se mantiene intacto, ya que existen leyes que lo protegen.

Además, las pequeñas zonas en la parte baja de la cuenca desaparecen y solo se aprecia zonas urbanas e industriales. Zonas de protección para los márgenes de los ríos en la parte baja desaparecen.

Finalmente, al asignar los nuevos números de curva, se observa que aumentan en un valor de 2 a tres unidades, pero el porcentaje de impermeabilización de cada subcuenca es el valor que cambia más notablemente aumentando de 16 a 20 % más según la subcuenca.

Tabla 23. Cobertura de suelo urbano e industrial esperada para el año 2020.

		Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo
2001	Suelo Permeable (km²)	0.56	2.29	4.13	1.10	11.21	0.42	5.63	18.74	2.96
2008		0.33	2.18	3.23	0.84	7.62	0.47	5.17	18.64	2.70
2012		0.35	1.93	2.91	0.83	7.28	0.41	4.96	17.37	2.37
2020		0.28	1.05	2.66	0.76	6.30	0.10	4.64	12.20	1.32
2001	Suelo no permeable (km²)	0.228	1.152	3.068	1.159	11.555	0.1	2.701	3.243	1.688
2008		0.45	1.265	3.96	1.411	15.155	0.05	3.154	3.352	1.943
2012		0.43	1.51	4.29	1.43	15.49	0.11	3.36	4.62	2.27
2020		0.50	2.39	4.53	1.50	16.47	0.42	3.69	9.78	3.32

Tabla 24. Evaluación de la cobertura futura para conocer si sobrepasa área de aporte del cantón.

	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo
Suma Área No Permeable Proyectada (km²)	1.24	2.93	9.17	3.80	26.31	0.46	7.77	11.34	4.32
Evaluación	Sobrepaso	No sobrepaso	Sobrepaso	Sobrepaso	Sobrepaso	No sobrepaso	No sobrepaso	No sobrepaso	No sobrepaso
Área no permeable real (km²)	0.79	2.93	7.19	2.26	22.75	0.46	7.77	11.34	4.32

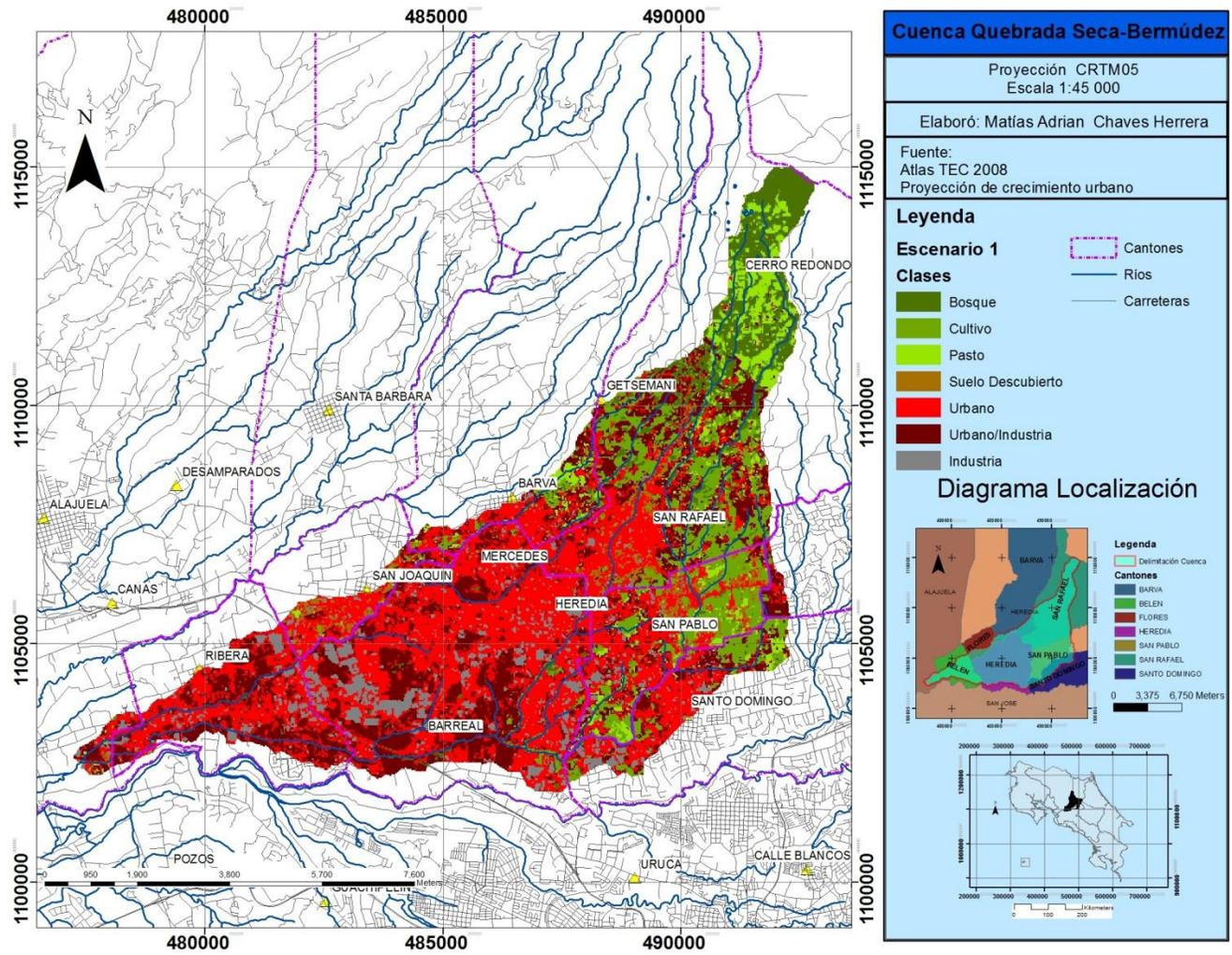


Figura 22. Mapa de uso suelo, escenario 1.

5.2.2 Segundo escenario

El segundo escenario (Figura 23) fue elaborado mediante los planes reguladores de los cantones: Belén, Heredia, Flores, San Pablo y San Isidro. Para los cantones de Barva, San Rafael, Santo Domingo y Alajuela se utilizó los mapas de zonificación propuestos por PRUGAM. De igual manera, se asignó el número de curva y coeficientes de escorrentía para los posteriores cálculos en el modelo hidrológico.

Hay que hacer mención que muchas de las clasificaciones realizadas por estos planes no coinciden entre sí, no obstante, se referencia a las clasificaciones propuestas para mantener una correlación y poder realizar comparación.

Es importante mencionar que muchas de las zonas verdes dentro de las ciudades como cafetales serán cambiadas por zonas aptas para urbanización, según los planes reguladores, especialmente en la cuenca del río Bermúdez. Aparecerá una amplia zona urbanizada en la parte alta de la cuenca, zona norte de San Rafael.

No obstante, en la parte media del cantón de San Rafael se decide dejar esa zona para cultivos y pastoreo. De igual manera, en la parte oeste, en el cantón de Santo Domingo, San Pablo y San Isidro se espera dejar esa zona para actividades agrícolas.

Esta medida podría provocar aumentos tanto en la cantidad de agua como en su rapidez. En la parte alta en la cuenca, se tienen precipitaciones más intensas, tanto en cantidad de agua como en corta duración de caída. Si esta zona alta llega a estar impermeabilizada puede provocar que el agua aumente de velocidad y, cuando llegue al cauce, provoque problemas de erosión, o también tomar velocidad y, cuando llegue a la parte baja donde se encuentra la mayoría de los puentes, provoque problemas de socavación en las bases de estos.

El crecimiento industrial crecerá ampliamente en la zona franca ubicada a orillas de la carretera interamericana. Otras zonas industriales aparecerán en el límite de Heredia y Santo Domingo. Cabe destacar que el centro de Heredia se establece como una zona comercial.

Hay que señalar que en los planes reguladores se espera proteger los márgenes en los ríos, dejando una cobertura apta para la restauración del río. De la Tabla 25, vemos como predomina el área permeable a excepción de los cantones de Belén y San Joaquín de Flores. De la Figura 23 vemos como existe lineamientos entre las zonas que son asignadas para un

uso. Por lo tanto, es visible el objetivo de un equilibrio de zona urbana/industrial con las zonas para protección de recursos y actividades agrícolas.

Comparado con la cobertura del año 2012, este escenario espera un aumento tipo uso urbano de 45%, suelo descubierto no es tomado en cuenta como un uso de suelo; 86% del área para pasto será asignado para cultivo, por lo que el cultivo tendrá un aumento de área a un 132%, debido a que se espera una restauración de los márgenes en los ríos, teniendo una protección de 5 metros en los márgenes, por lo que el uso tipo bosque aumentará en un 75%. En términos generales el suelo no permeable aumentaría un 55% (Tabla 26).

Tabla 25. Área impermeable del escenario 2 por cantón.

	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo	Total
Suelo Permeable (km²)	0.557	1.21	2.58	0.81	12.88	0.3	2.98	11.03	2.258	34.6
Suelo no permeable (km²)	0.23	2.13	10.41	1.22	10.3	0.32	5.36	10.78	2.5	43.2

Tabla 26. Cobertura de uso de suelo escenario 2 adecuada a clasificación propuesta.

Uso de suelo	Escenario 2	
	Km ²	% de Cobertura
Bosque	9.8	14%
Pasto	1.6	2%
Cultivo	12.7	18%
Suelo descubierto	0.0	0%
Industria/Comercio	7.3	10%
Urbano	40.6	56%
Total	71.919	100%

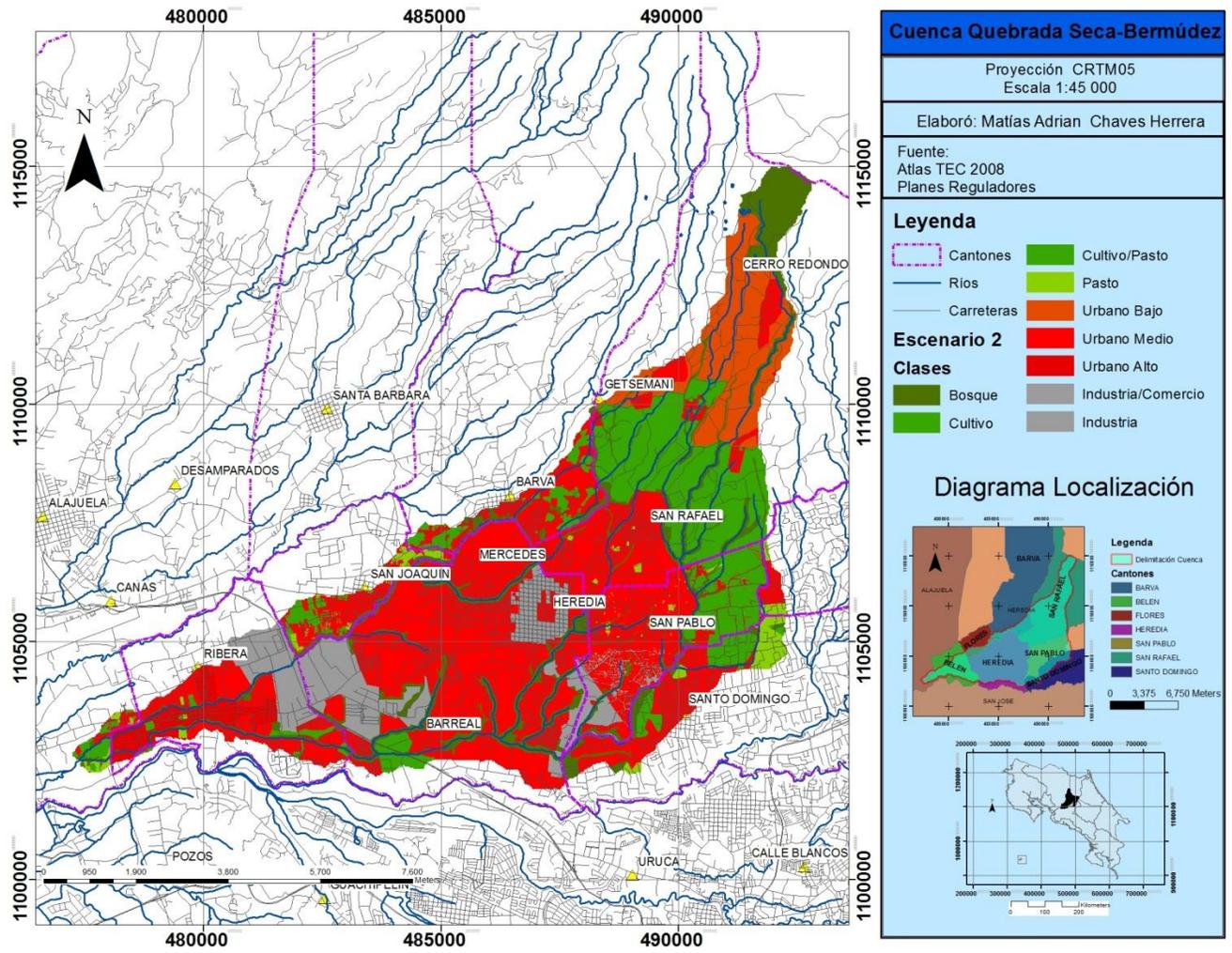


Figura 23. Mapa de uso de suelo de escenario 2.

5.2.3 Conclusiones del análisis temporal a nivel de cuenca.

Analizando los porcentajes de cambio durante los 3 años, vemos como la tendencia al crecimiento urbano en la cuenca ha sido alta. La industria sigue en ámbito de crecimiento. A pesar que el límite en la cuenca abarca partes de las comunidades como Flores y Barva, se presenta, de igual manera, un aumento significativo en sus porcentajes de uso urbano.

Es importante mencionar que las áreas tipo pasto, cultivo o suelo descubierto dentro de las zonas urbanas, pueden ser importantes focos en donde el agua puede ser captada para la recarga de agua en los acuíferos; no obstante, esto puede provocar un foco de contaminación para los acuíferos debido a la aguas contaminadas.

Las áreas boscosas se encuentran concentradas en la parte más alta, media y oeste de la cuenca; dispersada, utilizada como límite entre pastizales o localizada en los ríos. De igual manera, los pastizales se encontraron en la parte alta de la cuenca para su utilización en actividad agrícola. El mayor porcentaje de área de cultivo se encontró en la parte sureste de la cuenca, en los cantones de San Rafael y San Pablo. De igual manera, el área permeable ubicada en Barva, Santo Domingo, San Rafael y San Pablo que mostraron tener alto grado de cobertura deben de considerarse también como importantes focos purificación de las aguas, mediante el proceso de infiltración hacia los mantos. Se puede ver que, a través de los años, en la zona norte, principalmente San Rafael, se mantuvo sin grandes cambios, en donde la cobertura vegetal impera en la zona, de mucha importancia para la infiltración de las aguas y para la subsecuente la recarga de agua en los acuíferos.

Las zonas de pasto en la zona alta pueden dar indicios de ganado, lo que significa compactación del suelo, pero se visita la zona y se consulta en la municipalidad, descubriendo que la actividad ganadera es muy poca. El escenario uno si bien es un escenario que no posee ningún tipo de restricción en su diseño, este permite analizar qué tan crítico puede llegar a convertirse la cuenca sino se le aplica los controles urbanísticos a la zona de estudio. También el escenario uno permite evaluar posteriormente los caudales críticos generados dado este crecimiento poblacional en las cuencas de Quebrada Seca y Río Bermudez y ser analizados para conocer que tanto puede generar un evento extremo de lluvia en zonas totalmente impermeabilizadas. El escenario dos da a conocer que las medidas o lineamientos actuales para el crecimiento urbano generaran caudales altos y cercanos a los del escenario 1.

Capítulo 6. Modelación hidrológica

Gracias a los mapas usos de suelo, condición hidrológica, tipo de suelo y al análisis en la precipitación, se logró obtener el mapa de número de curva en la zona para cada uno de los años: 2001, 2005, 2012, escenario 1 y escenario 2 (Tabla 27).

Utilizando la extensión GeoHMS del programa ARCMAP, se procedió a delimitar la cuenca, gracias a las curvas de nivel cada 10 metros proporcionadas por el programa de Regularización y Catastro. Estas curvas de nivel, en conjunto con la topografía de la zona pueden ser vistas en la Figura 24.

También, en la Figura 24 se puede observar que tan cerca están las curvas una de otra, lo que nos puede dar una idea de la velocidad con que toma el agua al desplazarse en los ríos, además resulta interesante ver que entre ello, cerca de la zona central de la cuenca, se estable una zona relativamente plana.

Mediante la capa de ríos se seleccionaron nueve puntos de desagüe en los ríos más representativos para delimitar 9 subcuencas en la zona, dependiendo de la extensión y los tributarios se seleccionaron los puntos de desagüe, para Bermúdez se seleccionó cuatro, para Quebrada Seca dos puntos; para Burío, Pirro y Turales, solamente uno (Figura 25).

El comienzo de río Bermúdez en la parte alta de la cuenca se escogió para delimitar la primera subcuenca, hasta llegar a unirse con el río Turales, este también fue seleccionado para generar una subcuenca. De ese punto de unión hasta unos 2780 metros más abajo se seleccionó otro punto de descarga para generar la subcuenca “Río Bermúdez Arriba”, este contiene varios tributarios; debido a que 5318.3 metros de la longitud del río se encuentra la unión del río Bermúdez con el tributario “Quebrada Burío” se designó el siguiente punto de descarga para formar la subcuenca “Río Bermúdez Medio”, además se asignó otro punto de descarga para formar la subcuenca “Quebrada Burío”. Desde esa unión hasta la unión del río Bermúdez con Quebrada Seca se generó la subcuenca de “Río Bermúdez Abajo”. Similarmente, la subcuenca “Quebrada Seca Abajo” fue delimitada de la unión con río Bermúdez hasta 7364.9 metros río arriba hasta la unión con el río Pirro. En este punto se generaron las 2 siguientes subcuencas “Río Pirro” y “Quebrada Seca Arriba”

Se puede observar de la Tabla 27 que las áreas de las subcuencas se encuentran semejantes unas de otras a excepción de Quebradas Seca Abajo y río Bermúdez Abajo. Otro dato importante a mencionar es la similitud de la pendiente del río con la de la cuenca, ya que en algunos casos las dos pendientes compartían los mismos puntos de elevación más alta y más baja.

Tabla 27. Características de las subcuencas modeladas

	Área (Km ²)	Elevación más alta (msnm)	Elevación más baja (msnm)	Línea de drenaje más larga (m)	Largo Río (m)	Pendiente río	Pendiente de la cuenca
Quebrada Bermúdez	4.87	2010.8	1227.5	9518.2	8018.8	0.08	0.082
Quebrada Burío	7.4	1610	1064.5	10129	8428.5	0.053	0.054
Quebrada Seca Abajo	10.33	1128.7	850	4146	9136.5	0.023	0.067
Quebrada Seca Arriba	5.65	1546.4	1064.5	8054.1	7364.9	0.061	0.06
Quebrada Turales	7.37	2260	1225	10541.8	8891.3	0.079	0.098
Río Bermúdez Abajo	11.94	1130	850	12349	9714.1	0.018	0.023
Río Bermúdez Arriba	7.5	1535.7	1144	7385.1	2728	0.031	0.053
Río Bermúdez Medio	8.8	1210	1020.3	6768.3	5318.3	0.024	0.028
Río Pirro	7.85	1610	1013.8	10641.4	8781.1	0.056	0.056

6.1 Número de curva para los escenarios pasados

Como anteriormente se ha mencionado, para poder obtener los números de curva se requiere determinar el tipo de infiltración en la cuenca, dependiendo de la infiltración, se le asignará un grupo hidrológico a tipo suelo.

Se investigaron estudios anteriores del suelo en la zona, como el de Hernández, López y Richmond (2002), en el cual se determina un número de curva basados en una clasificación de capacidad suelo. En ella determinan un tipo de suelo hidrológico B para los poblados: entre San Joaquín de Flores-Belén, Mercedes, Heredia, la parte baja de San Rafael y Barva. Para la zona cerca de los pueblos de Getsemaní, Uvita, Riviera, Asunción y San Antonio, un suelo hidrológico A.

Complementando la investigación, se descubre que en los planes reguladores de Heredia y San Joaquín de Flores hay datos importantes del suelo. El plan regulador de Heredia indica que el 64,6 % del área está bajo la capacidad III, un 25,1% estaría para la capacidad V, 7,6% estaría para clases VIII y/o VII, para el restante 2,7% sería para VI. Flores en su plan regulador establece que su suelo tiene una capacidad de infiltración de 0.6 cm/hr, lo que sería una infiltración moderada.

Además, estudios geotécnicos, realizados en los puentes, fueron solicitados en cantones de Heredia y Belén. Estos dan otra perspectiva del suelo. Estos estudios se realizan para conocer la capacidad de soporte de los puentes. Dichos estudios establecen un tipo de suelo limoso en Belén; para Heredia, se tienen arenas finas, arenas limosas, limos y limos arcillosos. Cabe destacar que en Heredia, cerca del límite con Flores, se establece que se tienen limos.

Para las localidades faltantes, se utilizó la metodología propuesta, la cual utiliza la taxonomía del suelo. Analizando las características antes mencionadas por los estudios, se establece que Heredia, Belén y Flores poseen un drenaje bueno, en consecuencia, se asigna un grupo hidrológico B, al cual le corresponde tasas de infiltración entre 0.38 a 0.76 cm/hr (Muñoz, 2005) y, según la taxonomía de los demás cantones, se concluye también que caen en la categoría de grupo B.

Siguiendo con la asignación de número de curva, fue necesario asignar otras características del tipo de cobertura. Se escogió la clase de tierra cultivada sin tratamiento de conservación, ya que esta es la condición es más crítica en que posiblemente se encuentren en algún momento los cultivos en la cuenca (Tabla 28).

De igual forma, para pastos se escoge la de condiciones pobres. Bosque se determinan que son bosques de cubierta pobre. Para la clase urbana, se escogió la clase llamada residencias de menos de 500 m² ya que encajan mejor con las residenciales en la parte de las periferias urbanas, además debido a que se tiene un pixel de 30 metros, un pixel urbano puede estar mezclado con un porcentaje de vegetación.

Con el mapa de número de curva generado a partir de las imágenes satelitales, se procedió a realizar un ponderado para cada subcuenca dependiendo del año del uso de suelo (Tabla 29). Se seleccionaron los parámetros necesarios en el modelo del programa HEC-HMS; por ejemplo, para separar la precipitación neta se seleccionó el método de número de curva del SCS (que requiere tanto el número de curva como el porcentaje de impermeabilidad), para transformar la lluvia neta en escorrentía se utilizó el modelo tipo hidrograma unitario.

Tabla 28. Número de Curva. Fuente: Muñoz 2005

Número de Curva	
Uso de Tierra	Grupo Hidrológico B
Cultivos	81
Pastos	70
Bosques	55
Industria	88
Urbano	85
Suelo Descubierta	82

Tabla 29. Número de curva para cada subcuenca.

Nombre de la Cuenca	Año 2001	Año 2008	Año 2012	Escenario 1	Escenario 2
Quebrada Bermúdez	70.6	63	69.55	70.35	78.69
Quebrada Turales	70.9	67.4	69.55	70.94	72.18
Río Bermúdez Arriba	79.6	79.9	80.18	81.12	77.91
Quebrada Burío	79.4	78.8	80.74	82.63	79.67
Quebrada Seca Arriba	79.3	79.4	81.39	82.38	79.01
Río Pirro	81.9	82.2	82.93	83.26	81.01
Río Bermúdez Medio	81.6	81.6	83.02	83.48	79.96
Río Bermúdez Abajo	80.4	82.2	82.67	85.13	81.16
Quebrada Seca Abajo	81.8	83.9	83.73	85.02	82.95

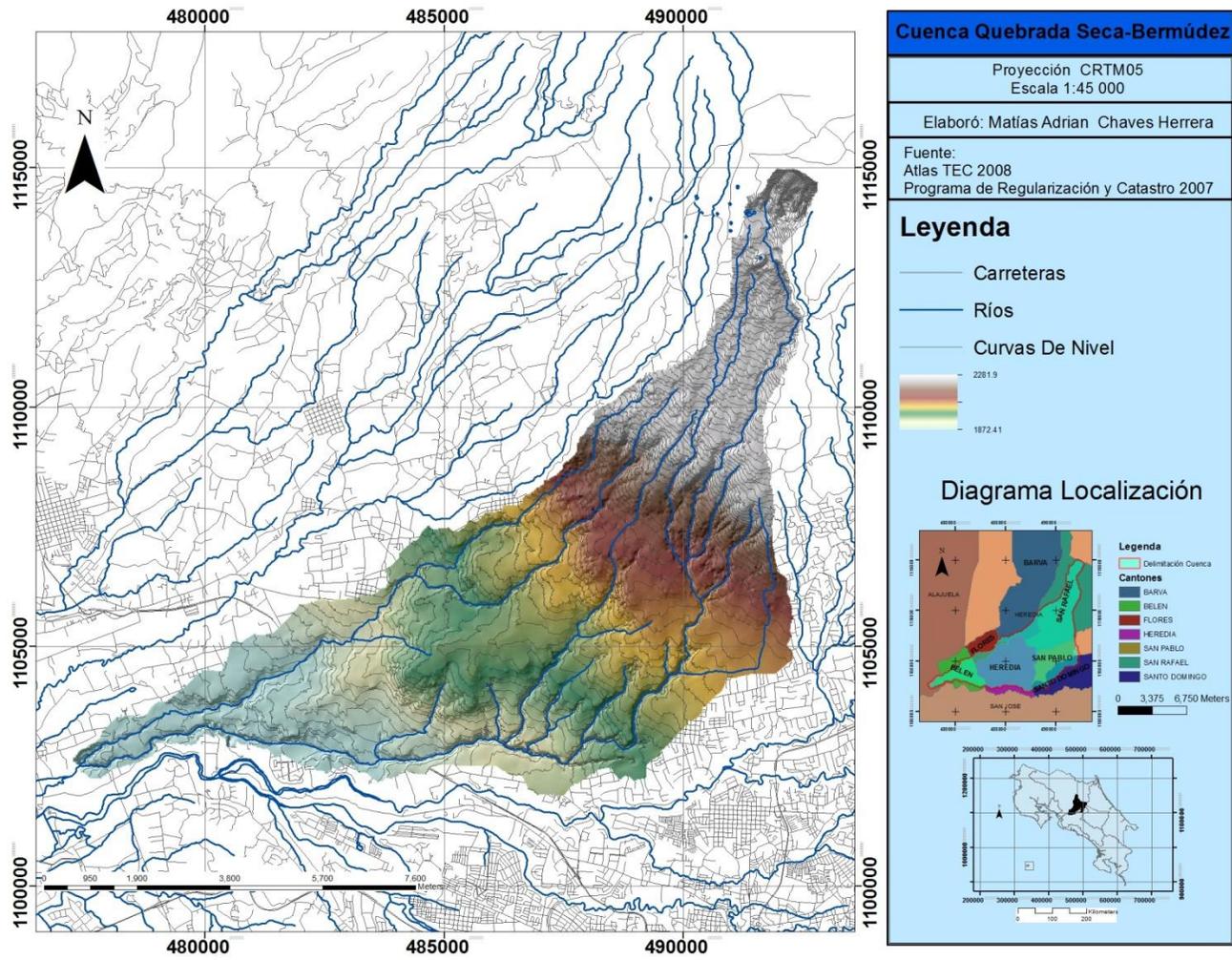


Figura 24. Topografía de la cuenca.

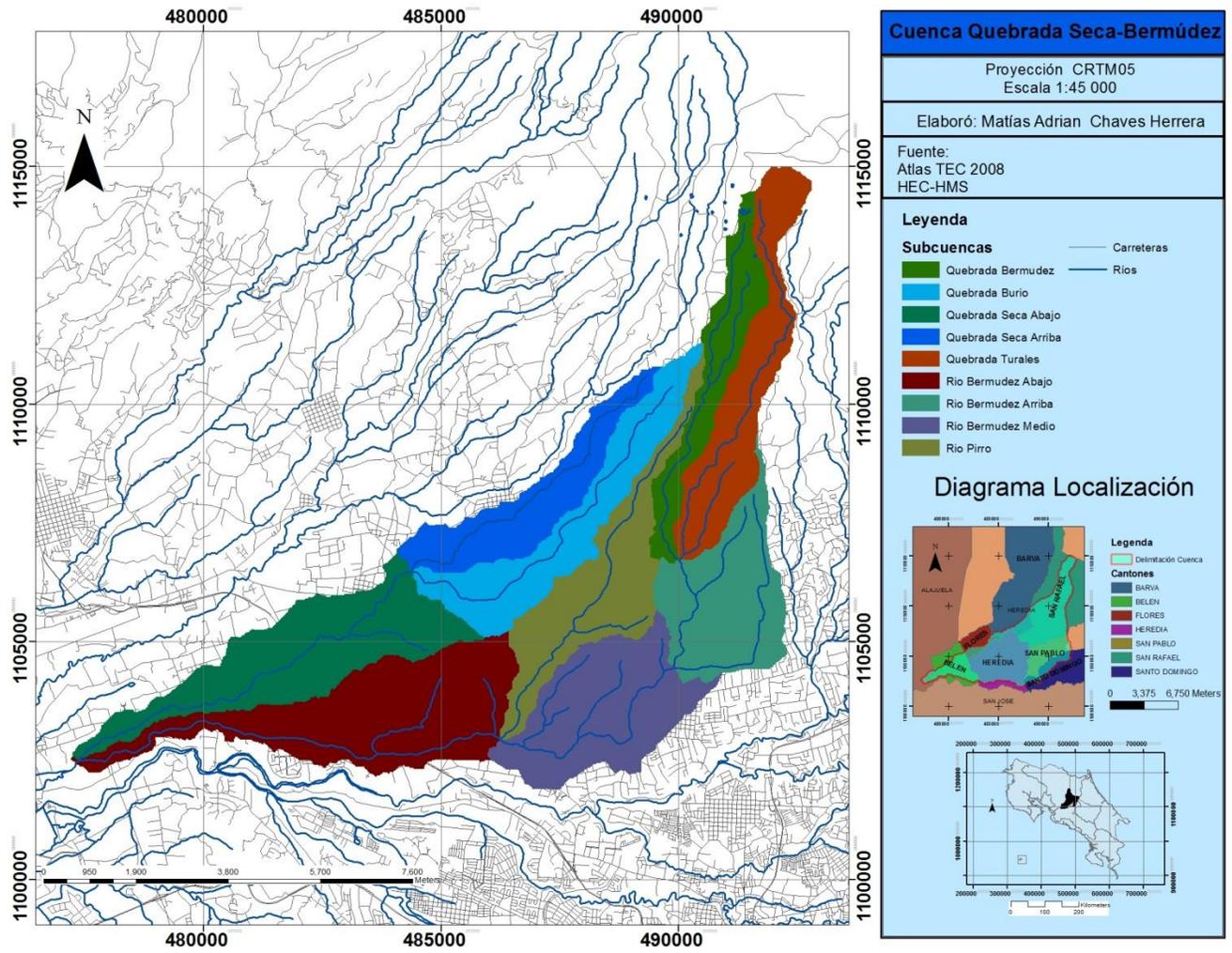


Figura 25. Subcuenca obtenidas.

6.2. Análisis de la precipitación

Así como se menciona en la metodología, se obtuvieron las láminas de lluvia máximas de diferentes duraciones para cada año, de igual forma, se obtuvo las intensidades para distintas duraciones de cada año. Las estaciones de estudio fueron las presentes en la Tabla 30 y se puede visualizar su locación en la Figura 26.

Es importante mencionar que los modelos hidrológicos requieren no solo de un valor puntual de lluvia o intensidad de tormenta, requieren de una distribución temporal de una tormenta. Una manera de lograr transformar una lámina de lluvia referida a un periodo de retorno y una duración dada es mediante el método de bloques alternos.

El método de bloques alternos distribuye el dato puntual de una precipitación máxima a un periodo de retorno, a un hietograma sintético basado en un comportamiento de lluvia de forma triangular. Se trata de distribuir, por ejemplo, 127.7 mm de lámina de agua de un periodo de 100 años y duración de 6 horas en un hietograma sintético con un inervalo de tiempo de 30 minutos, cuyo valor más alto se encuentra al centro de la duración de la lluvia.

Tabla 30. Estaciones Metrológicas del IMN.

NOMBRE	NÚMERO IDENTIFICADOR	LATITUD (Grados)	LONGITUD (Grados)	PROMEDIO DE LLUVIA ANUAL 2008 (mm)	ELEVACION (m)
AEROP. JUAN SANTAMARIA	84021	10	-84.2	1713.7	932
SAN JOSE	84001	9.93	-84.08	1444.4	1172
SANTA BARBARA	84171	10.03	-84.16	2457	1060

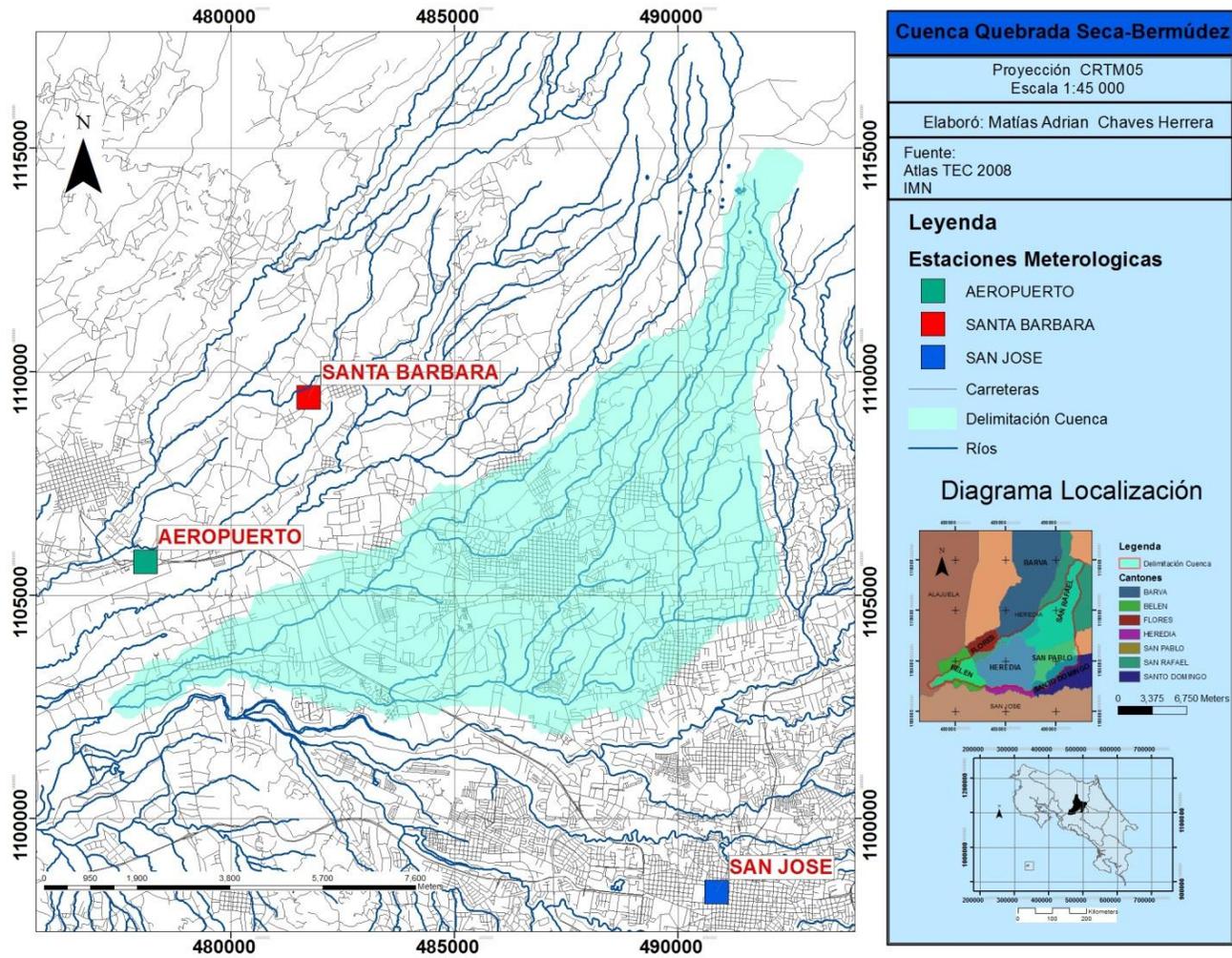


Figura 26. Localización de las Estaciones del IMN.

La información pluviográfica se consiguió del Instituto Metrológico. Los registros abarcan 17 años para la estación de San José, 15 años para la estación del Aeropuerto Juan Santamaría y 11 años para la estación Santa Bárbara.

Seguidamente, al analizar los registros se encontraron horas faltantes o errores en la digitación de algunos datos; en la estación Juan Santamaría se tiene 1524 horas distribuidas entre 14 años, en las que no se tienen datos. Para la estación de Santa Bárbara se tienen 432 horas sin registro distribuidas entre 11 años. La estación de San José no presentó faltante en sus registros. En estos faltantes de registro, se verificó que estos no estuvieran ubicados dentro de eventos importantes de lluvia.

Siguiendo el análisis, se obtuvieron las láminas máximas de precipitación para duraciones de 1, 2, 4, 6, 12 y 24 horas. Estas se presentan a continuación en la Tabla 31.

Tabla 31. Láminas máximas de lluvia anuales para duraciones de 1 hora.

Año	Lluvia Máxima (mm) Duración 1 hora		
	San José	Aero. Alajuela	Santa Bárbara
1995	24.1	0	0
1996	33.3	0	0
1997	36.5	0	0
1998	24.9	14.4	0
1999	27.6	48.7	0
2000	34.8	37.3	0
2001	60.9	48.4	31.1
2002	37.5	29.1	59.9
2003	46.3	42.8	44.8
2004	36.4	38.9	48.6
2005	52.4	32.1	41.4
2006	36.7	32.4	54.7
2007	47.5	50	43.6
2008	26	47.8	40.9
2009	43.1	36	64.7
2010	26.9	43.8	40.8
2011	29.8	33.8	65.5
2012	31.6	33.1	87.1

Como se puede observar, la estación de Santa Bárbara, que se encuentra a mayor altitud, posee datos de alta cantidad de lluvia. Como se menciona en las características generales de la cuenca, la mayor cantidad de lluvia cae en la parte alta de la cuenca, así que, a como se aumenta la altura, aumenta la cantidad de lluvia. Este es un dato importante, ya que resalta la importancia del análisis de la parte alta de la cuenca.

Obteniendo las láminas máximas para una duración de 24 horas, se puede observar en la Figura 27 como en las tres estaciones se sobrepasaron los 80 mm en varios casos, inclusive sobrepasan los 100 mm y llegan en tres ocasiones a más de 140 mm; esto es un dato importante, debido a que la tormenta del 13 de junio del 2007, que provocó importantes daños y requirió de intervención de Consejo Nacional de Emergencia, fue una tormenta que generó entre 90 a 100 mm de lámina de lluvia (ICE, 2007).

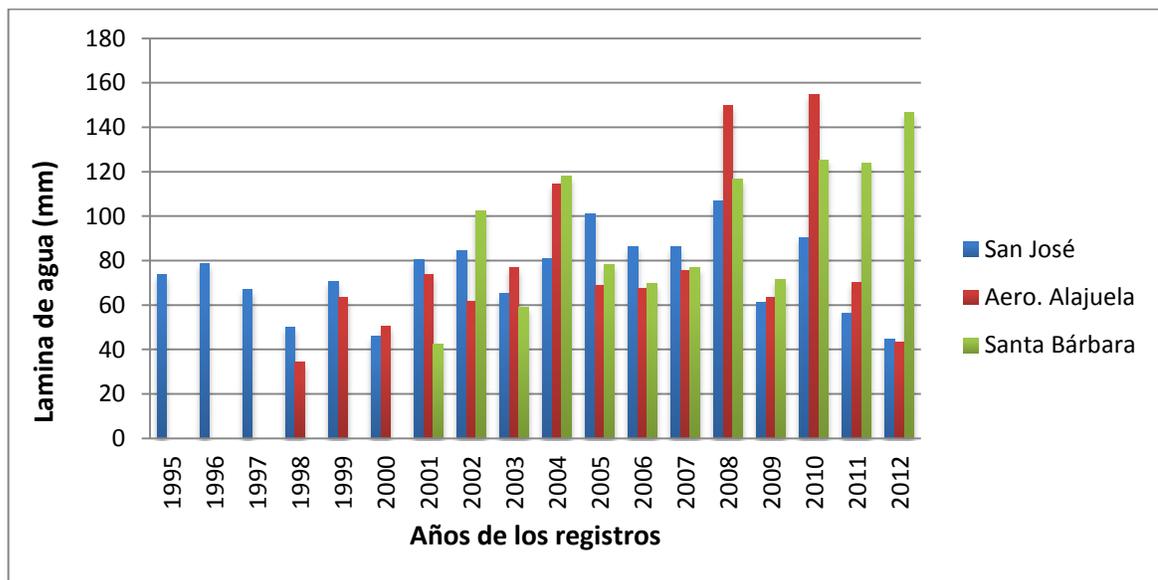


Figura 27. Láminas Máximas Duración 24 horas. Fuente IMN.

Utilizando la tormenta del 13 de junio 2007 (Figura 28), podemos ver el comportamiento de tipo de tormentas extraordinarias que ocasionan las inundaciones en la parte baja de la cuenca. Vemos como este tipo de tormentas tienen la mayor cantidad de agua en la segunda hora. En esta hora cae casi del 50 al 60 por ciento de la totalidad del agua de la tormenta, lo que le da la característica de saturar el suelo a una alta velocidad, provocando así una escorrentía inmediata de la tormenta.

Es importante mencionar que la lluvia de los días 5 anteriores que cayó en cada estación fue de 34 mm en San José, 48.6 mm en el Aeropuerto, 72.4 mm en Santa Bárbara generando

una condición antecedente de Humedad II para las dos primeras estaciones y condición III para la estación de Santa Bárbara. Se utiliza la condición de humedad II para la modelación ya que por las características del suelo y la cobertura vegetal representa mejor el escurrimiento que tiene la zona de estudio.

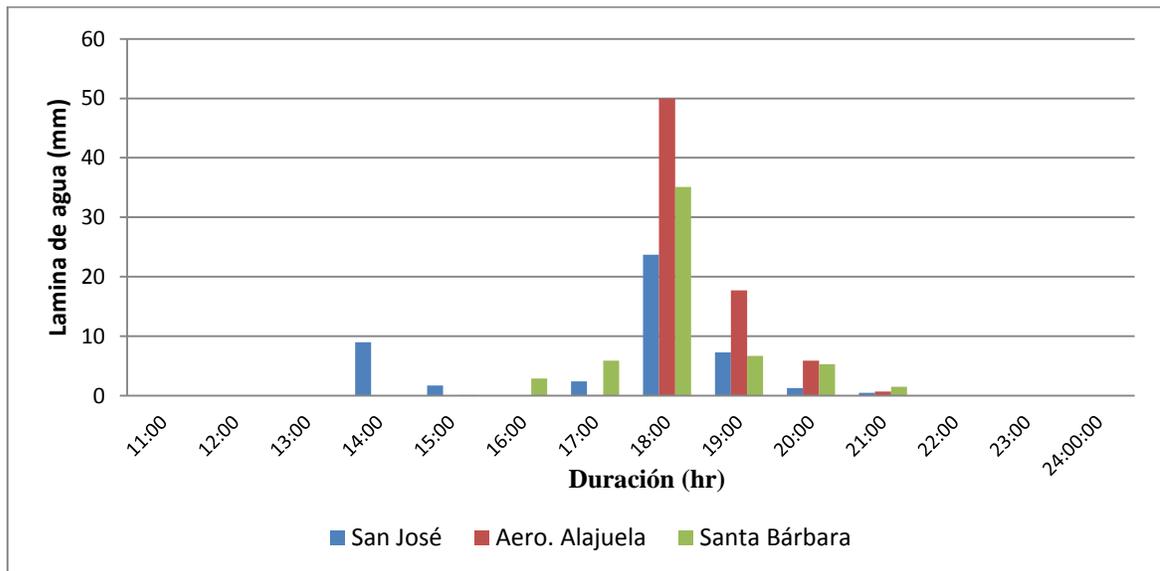


Figura 28. Caracterización de la Tormenta del 13 Junio 2007

Del análisis de varias lluvias, las tormentas ocurren en horas de la tarde, de las 14 a las 20 horas del día. También, durante setiembre a octubre, se puede esperar lluvias todos los días; ya que estos meses son los meses de más lluvia y de más humedad relativa (Masís & Vargas, 2011).

6.2.1 Análisis de las láminas de precipitación a distintos periodos de retorno

Una vez obtenidas las láminas acumuladas máximas por distintas duraciones para diferentes periodos de retorno según cada estación, se puede observar que, para una duración de 4 a 6 horas en la que dura una tormenta común en la zona, se obtienen láminas de agua de 71 y 77 para periodos de retorno de 5 años.

Los datos fueron analizados con el programa HidroEsta, mediante el cual se compararon distintos análisis de distribución, la distribución Normal, Gumbel, Gamma de 2 parámetros y log-Pearson. Todas las curvas se ajustaron a un 95 % de probabilidad de exactitud. Por lo que se procede a hacer una verificación visual, tal grafica es mostrada en la Figura 29. Se concluye que la que mejor se ajusta es tipo Gumbel.

Al analizar las láminas (Tabla 32) generadas en periodos de retorno de 5 años, resulta interesante observar que la capacidad del río Quebrada Seca no soporta lluvias de periodos de retorno superiores a los 5 años, como lo fue la tormenta del 13 de junio de 2007 (ICE, 2007), esto se puede colaborar al ver que el promedio de lluvia de las tres estaciones de ese día fue de 60 mm.

Cabe destacar que las láminas máximas de periodo de 50 años, con las que se construyen las principales estructuras de puentes y otras infraestructuras hidráulicas deben de contemplar caudales superiores a $60 \text{ m}^3/\text{s}$ a $169 \text{ m}^3/\text{s}$ para tormentas con duraciones de 1 hora y 24 horas respectivamente. Al observar la Figura 29 vemos como la línea azul que son los datos experimentales y la línea celeste que son los datos calculados teóricamente mediante Gumbel, tienen una gran similitud. No obstante vemos como los datos de las tormentas de corta duración no se ajustan muy bien pero para las láminas de tormentas de duración medias (4, 6 y 12 horas) si realiza una buena aproximación.

De la estación San José a como se muestra en la Tabla 33, podemos observar que se tienen valores más bajos que las demás estaciones, vemos como, para duración de tormentas de 4 a 6 horas y para un periodo de 5 años, se tienen valores de 61.9 a 68 mm de lámina de agua.

Se observa en la Figura 30 como a los datos de la estación también se le realizo comparación de distribuciones. Todas las distribuciones se ajustan, se escoge la Gumbel ya que gráficamente se nota que los datos tienen mejor similitud con la gráfica de distribución de Gumbel.

De igual forma la estación de Santa Bárbara presenta caudales superiores a los que el río puede abarcar a partir del periodo de retorno de 5 años (Tabla 34). A pesar de no estar tan aproximada a como lo está la estación de San José, vemos en la Figura 31 se aproxima muy bien a la ecuación de Gumbel.

Seguidamente se seleccionó las duraciones y los periodos de retorno que serán ingresadas al modelo hidrológico. Esto con el fin de optimizar la cantidad de resultados generados por el programa. Se escogen los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años, y las láminas de duración de 6, 12 y 24 horas. Dichos datos se presentan a continuación en la Tabla 35.

Tabla 32.Lámina de Precipitación para la estación Juan Santamaría.

Lámina Acumulada Máxima (mm) según su duración.						
Periodo de Retorno (años)	1 Hora	2 Horas	4 Horas	6 Horas	12 Horas	24 Horas
1.0	22	27	27	27	28	20
2	36	46	54	58	63	72
5	45	58	71	77	83	103
10	50	65	82	89	96	124
25	57	75	96	105	113	150

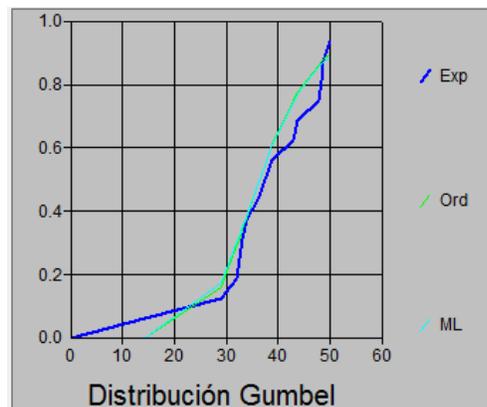


Figura 29. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación del Aeropuerto Juan Santamaría.

Tabla 33.Lámina de Precipitación para la estación San José.

Lámina Acumulada Máxima (mm) según su duración.						
Periodo de Retorno (años)	1 Hora	2 Horas	4 Horas	6 Horas	12 Horas	24 Horas
1.0	19.7	30.0	39.4	39.0	41.0	44.5
2	34.8	44.1	53.5	57.2	62.2	70.9
5	43.8	52.5	61.9	68.0	74.8	86.7
10	49.7	58.1	67.4	75.2	83.2	97.2
25	57.3	65.2	74.5	84.2	93.7	110.4

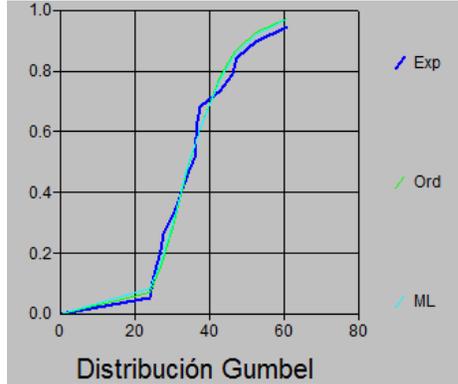


Figura 30. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación San José.

Tabla 34. Lámina de Precipitación para la estación Santa Bárbara

Lámina Acumulada Máxima (mm) según su duración.						
Periodo de Retorno (años)	1 Hora	2 Horas	4 Horas	6 Horas	12 Horas	24 Horas
1.01	26.8	31.7	31.1	35.3	38.3	42.4
2	49.4	59.9	69.8	76.0	78.9	89.4
5	62.9	76.8	93.0	100.3	103.1	117.5
10	71.9	88.0	108.3	116.4	119.1	136.1
25	83.2	102.1	127.7	136.7	139.4	159.6

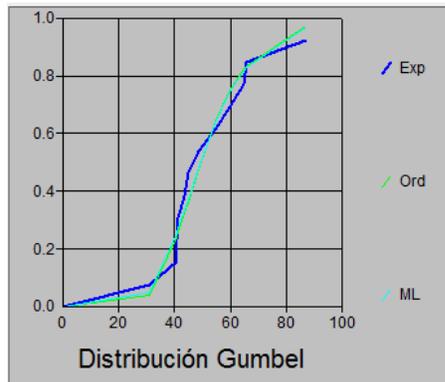


Figura 31. Gráfico de la Distribución Gumbel para el registro de la estación Santa Bárbara.
Fuente: HidroEsta.

Tabla 35.Láminas seleccionadas para el modelo hidrológico.

	Años	6 horas	12 horas	24 horas
San José	2	57.2	62.2	70.9
	5	68.0	74.8	86.7
	10	75.2	83.2	97.2
	25	84.2	93.7	110.4
Aeropuerto	2	57.9	62.5	72.1
	5	76.6	82.9	103.1
	10	89.0	96.4	123.7
	25	104.7	113.4	149.6
Santa Bárbara	2	72.8	78.9	88.9
	5	97.5	103.1	117.3
	10	113.8	119.1	136.1
	25	134.5	139.4	159.9

6.2.2 Intensidad de las tormentas

La intensidad de la lluvia se calculó para acumulados horarios y se obtuvieron intensidades de 1, 2, 6, 12 y 24 horas. Seguidamente se tabulan los valores de intensidades máximas en la Tabla 36, esto para distintos periodos de retorno de las diferentes estaciones pluviográficas en el área de estudio. Teniendo esta información, se realizarán las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) para obtener una mejor visualización de los datos, dicha gráfica se muestra en la Figura 32 para la estación el Aeropuerto. Las Curvas IDF de las estaciones de San José y Santa Bárbara se presentaran en los anexos.

Cabe destacar que las predicciones realizadas no toman en cuenta el cambio climático, el cual prevé que las lluvias irán aumentando 10% para el año 2020, además, se espera disminución de la duración de la estación seca y un aumento de la estación lluviosa (Villalobos, 2007) .

Tabla 36. Intensidades de lluvia para distintos periodos de retorno, mediante Gumbel.

Periodo de retorno (años)	Intensidad (mm/hr) con duración de 1 hr			Intensidad (mm/hr) con duración de 4 hr		
	San José	Aeropuerto Juan Santamaría	Santa Bárbara	San José	Aeropuerto Juan Santamaría	Santa Bárbara
1	19.7	22.3	26.8	9.8	6.7	7.7
2	34.8	36.3	49.4	13.4	13.6	16.9
5	43.8	44.8	62.9	15.5	17.8	22.3
10	49.7	50.3	71.9	16.9	20.5	26
25	57.3	57.4	83.2	18.6	24	30.6
30	58.7	58.7	85.4	19	24.6	31.5
50	62.9	62.6	91.6	19.9	26.5	34
100	68.4	67.8	99.9	21.2	29.1	37.4
200	73.9	72.9	108.2	22.5	31.6	40.7

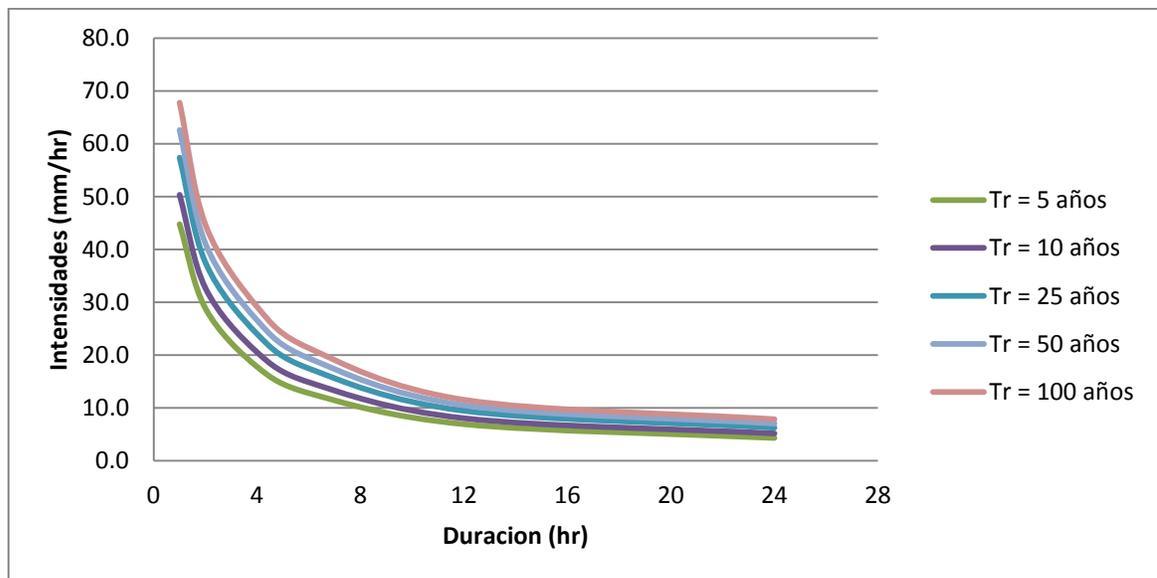


Figura 32. Curvas IDF mediante Gumbel de la Estación Aeropuerto.

6.2 Hidrograma sintético triangular de bloque aleatorio

Para ingresar los datos de las tormentas en el hietograma, se utiliza el método de bloques alternos, y una vez obtenidas las ecuaciones se procede a generar los distintos hietogramas sintéticos que serán usados como datos de precipitación en el modelo meteorológico de HEC-HMS. En la Figura 33 vemos un ejemplo de hietograma sintético.

Se seleccionó los siguientes periodos de retorno: 5, 10 y 25. Por otro lado, las duraciones de las tormentas de estos periodos fueron: 6, 12 y 24 horas. Al aplicar una tormenta de duración de 6, 12 y 24 horas se abarcan las tormentas que podrían caer en un evento extremo.

Además, se debe hacer la advertencia de que, como la cantidad de datos es 15 años o menos, los periodos de retorno superiores a 30 años tienen un error alto en la exactitud, por lo que, al ir aumentando los años, la extrapolación se vuelve más inexacta.

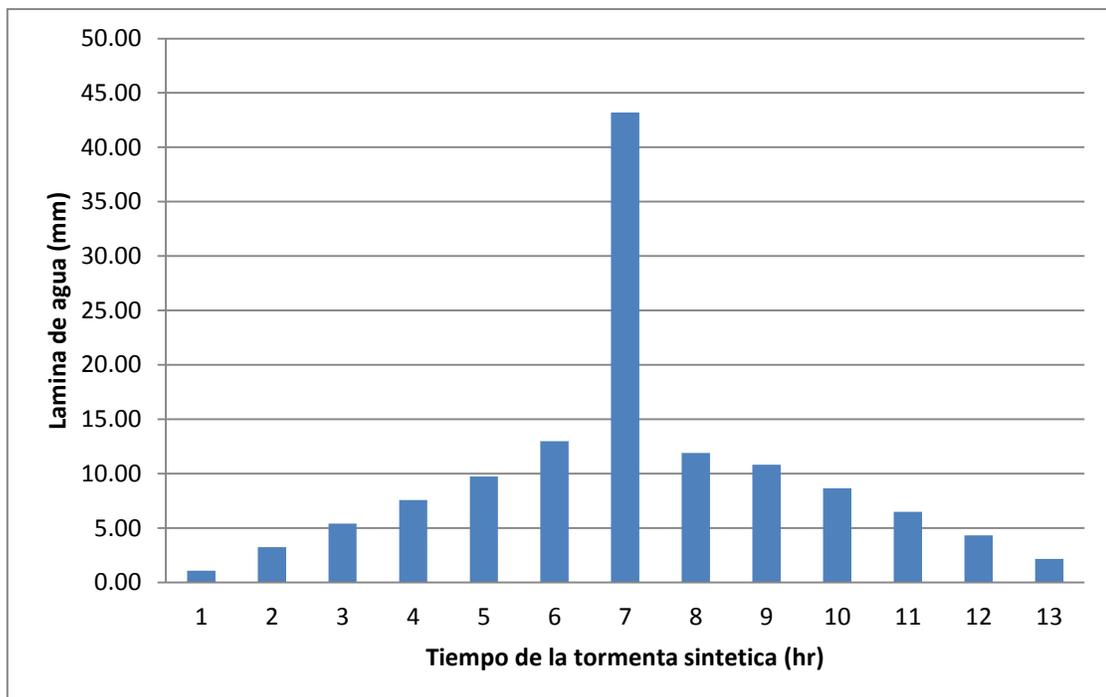


Figura 33. Hietograma triangular de la lámina de tormenta de 100 años y 13 horas de duraciones.

6.3 Tiempo de concentración

Vemos de la Tabla 37 como la fórmula de Kirpich, más usada por su simplicidad, da valores altos en función de la longitud y pendiente en que esté el recorrido del agua; no obstante, este no toma en cuenta las características de rugosidad de la cuenca, es decir, la cobertura del suelo. En cambio la fórmula de SCS, que sí toma en cuenta cobertura del suelo, tiende a sobreestimar valores con respecto a las otras fórmulas, más notorio en las subcuencas de alto porcentaje de impermeabilización. El método de líneas de isócronas toma en cuenta diferentes secciones del tramo y sus características, no obstante, requiere de características específicas, las cuales, debido a su dificultad de obtención, se promediaron.

La Agencia de Federación de la Aviación (FAA) toma en cuenta el coeficiente de escorrentía, por lo que es muy usado para cuencas urbanas. La ecuación onda cinemática, que toma en cuenta rugosidad e intensidad de lluvia, viene a depender de la constante “n” de manning que se escoja; se puede observar que para 0.03 genera valores muy semejantes a los de la fórmula Kirpich. Al obtener la mediana de los valores, vemos como esta da valores iguales o cercanos a la fórmula FAA, por tanto, está reflejando mejor las características de la cuenca. Se decide usar los tiempos de concentración obtenidos mediante FAA para el modelo hidrológico en HEC-HMS.

6.4 Tránsito de avenidas

Una vez seleccionadas las zonas donde se requiere la adecuación de un tramo, se procede a determinar sus elevaciones y el largo que tiene el tramo del río. Se encuentra, mediante visitas de campo, que en ambos afluentes, río Quebrada Seca y río Bermúdez, presentan una geometría rectangular en varias partes del río, las características obtenidas de los ríos se presentan en la Tabla 38.

Se tomaron fotos en la visita de campo, como se observa en la Figura 34 vemos como en casi la salida de Quebrada Seca tiene un tirante casi plano, además en su bordes se aprecian como sus márgenes se levantan en un ángulo de casi noventa grados.

De igual forma para la Figura 35 observamos las características de río Bermúdez cerca de su confluencia con Quebrada Seca. Vemos como semejante a su vecino posee un tirante plano en varios tramos, también sus altos bordes están con un corte de noventa grados y se aprecia una cobertura de plantas y musgo.

De esta manera, se utiliza la metodología de Muskingum Cunge en canal rectangular para la modelación de los tramos de los ríos Bermúdez y Quebrada Seca. Quebrada Seca solo requirió de su tramo en la subcuenca “Quebrada Seca Abajo”. Río Bermúdez se dividió en los tramos de las subcuencas de “Río Bermúdez Arriba”, “Río Bermúdez Medio” y “Río Bermúdez Abajo”

Tabla 37. Resumen de los tiempos de concentración (min)

	Recorrido más largo (m)	Kirpich	Isocronas	SCS	FAA	Onda Cinemática		Mediana
						n=0.030	n=0.040	
Quebrada Bermúdez	9518.2	59	76.4	207.1	100.3	59.12	77.9	77.11
Quebrada Burío	10129	72.9	58.8	224.7	85.6	69.18	91.8	79.25
Quebrada Seca Abajo	4146	33.7	49.1	96.9	43.7	67.94	90.2	55.84
Quebrada Seca Arriba	8054.1	58.7	33.6	182.9	73.7	61.82	77.5	67.76
Quebrada Turales	10541.8	59.7	69.5	205.2	100	59.66	78.5	73.99
Río Bermúdez Abajo	12349	118.5	83.2	408.4	126.6	97.65	134	122.56
Río Bermúdez Arriba	7385.1	57.5	104.1	184.8	80.9	35.32	76.3	78.57
Río Bermúdez Medio	6768.3	68.7	48.5	216.5	83	63.84	87.7	75.85
Río Pirro	10641.4	74.6	64.7	220.6	76.9	70.06	93.4	74.59

Tabla 38. Características de los tramos.

	Elevación Aguas Abajo (msnm)	Elevación Aguas Abajo (msnm)	Largo (m)	Pendiente	N de Manning	Ancho (m)
Tramo Bermúdez Medio	1010	1143.98	3947.91	0.03	0.045	10
Tramo Bermúdez Salida	850	1010	8831.98	0.02	0.045	15
Tramo Quebrada Seca	850	1060	8025.08	0.03	0.045	15
Tramo Turales-Bermúdez	1143.98	1225.03	2244.37	0.04	0.045	10



Figura 34. Forma del canal de río Quebrada Seca. Fuente: Visita de campo 2013.

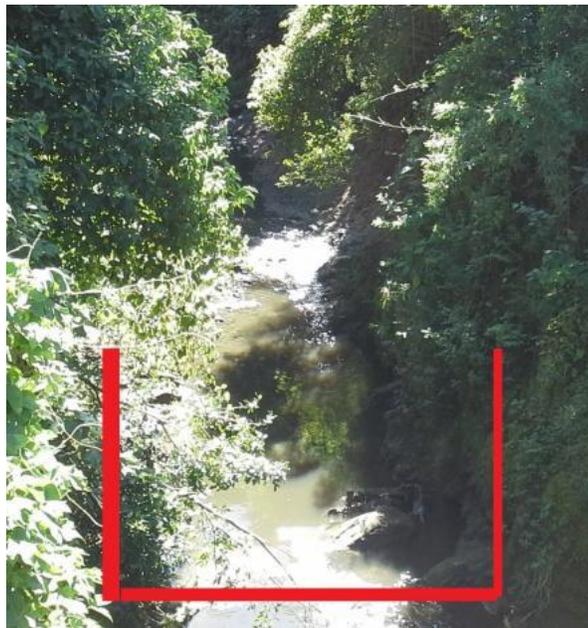


Figura 35. Forma del canal de río Bermúdez. Fuente: Visita de campo 2013.

6.5 Validación

Se procede a ingresar solamente la cuenca del río Quebrada Seca en Hec-Hms (Figura 40), se observa cómo se realizó una nueva división de subcuencas para ingresar el punto de validación registrado por (Segura, 2004), ubicado en el puente La Bodega.

La lluvia la cual Segura tomó registro de altura fue la del 1 de octubre de 2004 (Figura 36), esta fue ingresada en el modelado de este estudio dando un caudal de $31.9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 37). 12 cortes del modelo de Laura fueron ingresados en Hec-Ras y las condiciones establecidas por Laura fueron ajustadas (Figura 38). Se tomaron 3 secciones antes y después del puente de la bodega (9.982247° latitud y -84.176398° longitud), se ingresó las dimensiones del puente de la bodega, 5 secciones más; donde las cuales existe un puente el cual se ingresó de igual manera.

Por lo tanto, al modelarla tormenta con 57.8 mm de lámina de agua el caudal de $31.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en un régimen de flujo mixto, en la sección transversal en el puente de la bodega, se llega a de 928.2 m de elevación, (Figura 39), 6 cm menos que la altura registrada por Laura (30 cm desde el nivel del piso 928.80), por lo tanto, se logra colaborar que el modelo hidrológico propuesto se ajusta a la realidad.

Es importante mencionar, al comparar el hietograma (Figura 36) de la tormenta con el hidrograma de salida (Figura 37), que los picos entre ambos sucedieron casi una hora después. Dato importante para señalar la rapidez con que el agua se desplazó en este caso.

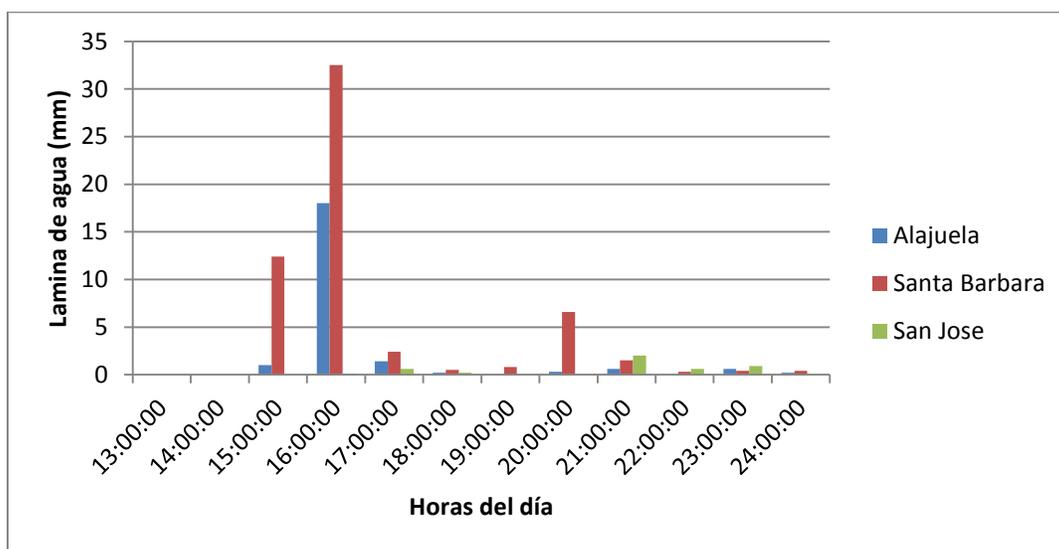


Figura 36. Registro de la tormenta del 1 de octubre del 2004 en tres estaciones.

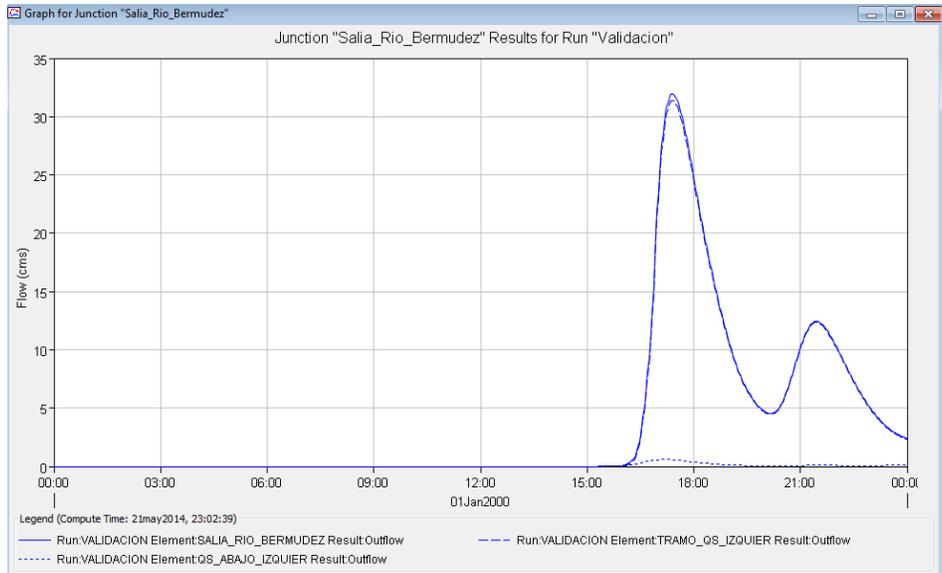


Figura 37. Hidrograma de la modelación.

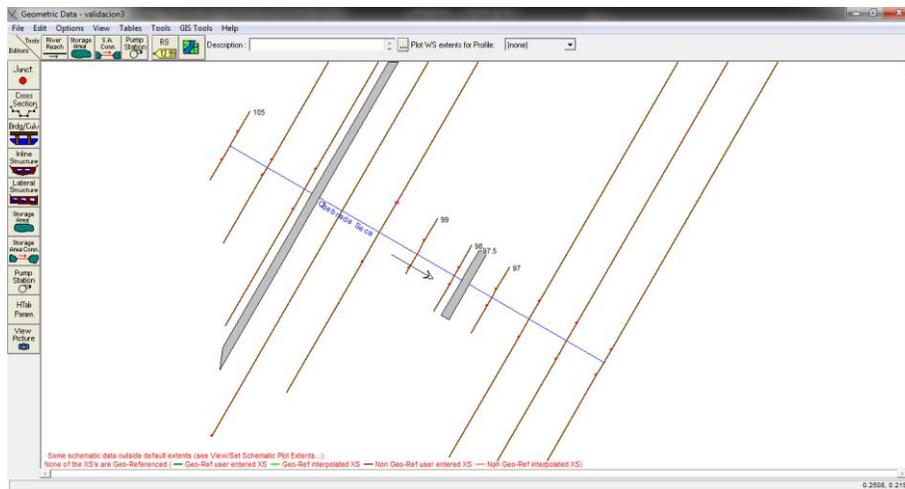


Figura 38. Cortes transversales de la modelación en HecRAS.

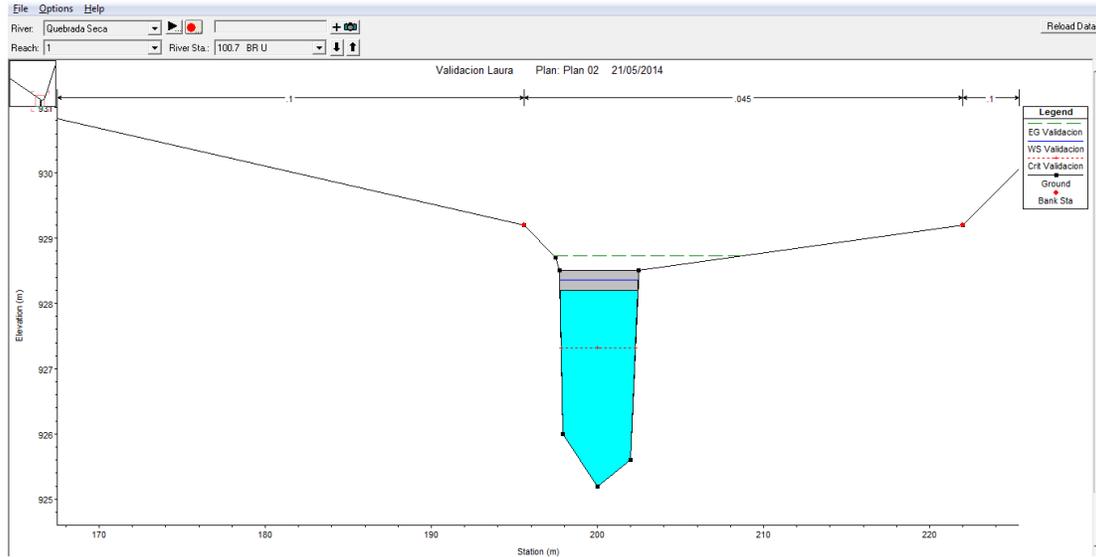


Figura 39. Corte transversal puente la bodega.

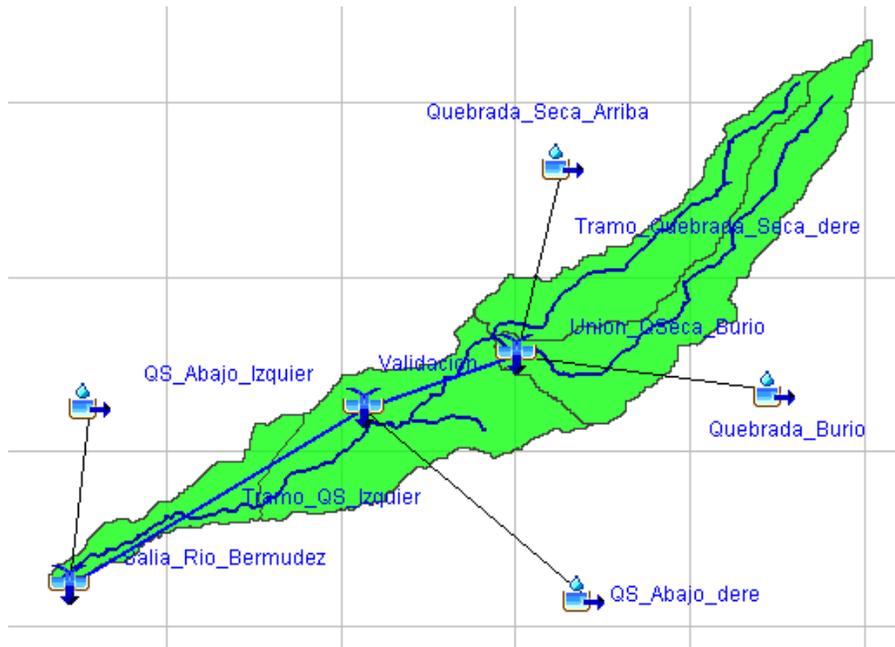


Figura 40. Esquema hidrológico de Quebrada Seca

6.6 Resultados modelación

Una vez cargados los datos en el modelo HEC-HMS (Figura 41), se procede a realizar la simulación para los años 2001, 2002, 2012, escenario 1 y escenario 2. Cada subcuenca tendrá su comando para determinar su aporte y se irán uniendo hasta obtener la salida de caudal de las cuencas de Quebrada Seca y río Bermúdez, y estos a su vez se unirán en una sola cuenca.

De esta manera, “Río Bermúdez Arriba” se unirá con “Quebrada Turales”, el aporte de la unión de estos ira en transportado mediante el tramo de rio llamado “Tramo Bermúdez Medio” que se unirá con la subcuenca “Tramo Turales-Bermúdez”, para ser este aporte transportado en el tramo “Tramo Bermúdez Medio” y este unirse a la subcuenca “Quebrada Burío”; de igual forma se unirá al tramo “Tramo Bermúdez Salida” para unirse a “Río Bermúdez Abajo”. Y de esta manera haber modelado toda la cuenca de Río Bermúdez, que se unirá a Quebrada Seca para formar toda la cuenca (Figura 41).

Similarmente, la subcuenca “Quebrada Seca Abajo” se unirá con “Rio Pirro”, el caudal de ellos será llevado por el tramo “Tramo Quebrada Seca” y se unirá a “Quebrada Seca Abajo”, para finalmente unirse con las subcuencas de río Bermúdez (Figura 41).

Como se puede observar en el hidrograma de Quebrada Seca de 100 años y 12 horas de duración en la Figura 42, vemos que en el año 2001 tiene poca intensidad y mayor extensión que los demás años. Esta característica favorece para que la cuenca pueda infiltrar y disminuir la escorrentía. Conforme pasan los años, vemos como los hidrogramas aumentan en intensidad y el tiempo de duración se reduce; provocando así más escorrentía.

El hidrograma de río Bermúdez de 100 años y 12 horas de duración en la Figura 43 tienen la misma característica de aumento en intensidad, el intervalo de tiempo donde se suscita la mayor cantidad de caudal está en el mismo rango que los subsiguientes años.

De los caudales generados en la Tabla 39, podemos observar una diferencia entre caudales de aproximadamente $100 \text{ m}^3/\text{s}$ entre la salida de la cuenca de Quebrada Seca y el río Bermúdez, recordando que la cuenca de Quebrada Seca tiene un aporte de 23.4 km^2 y la de Bermúdez de 54 km^2 . Además el río Bermúdez tiene más capacidad volumétrica según su perfil transversal.

Al obtener los porcentajes de incremento para cada uno de los años, vemos como se tiene una mayor probabilidad de aumento en las tormentas con periodo de retorno corto. Un impórtate patrón a reconocer es que el aumento de caudal más alto lo tiene Quebrada Seca, debido a que se cubrió gran parte de sus zonas aptas para la infiltración.

El dato más importante a resaltar es los aumentos esperados de caudal para los diferentes escenarios. Vemos como para el crecimiento urbano, según la tendencia de los años 2001 a 2012, se esperan crecimientos de 6% hasta 25% para diferentes duraciones y periodos de retorno (Tabla 40).

De igual forma, es importante mencionar que, según el plan regulador actual, en los cantones que lo tienen, no se espera ningún crecimiento ya que este escenario contiene números de curva ponderados menores que el año 2012 porque lo que es un adecuado escenario si se cumple los márgenes de protección de los ríos.

Realizando un análisis a nivel cantonal, es decir, cambiando solamente el uso de suelo del escenario 1 de un cantón y dejar los demás con uso de suelo del 2012, a como se presenta en Tabla 41 podemos conocer el aporte de aumento de Heredia a la cuenca. De los resultados se obtiene un rango de 1 a 3 por ciento de aumento, del tiempo de retorno y la duración de la tormenta.

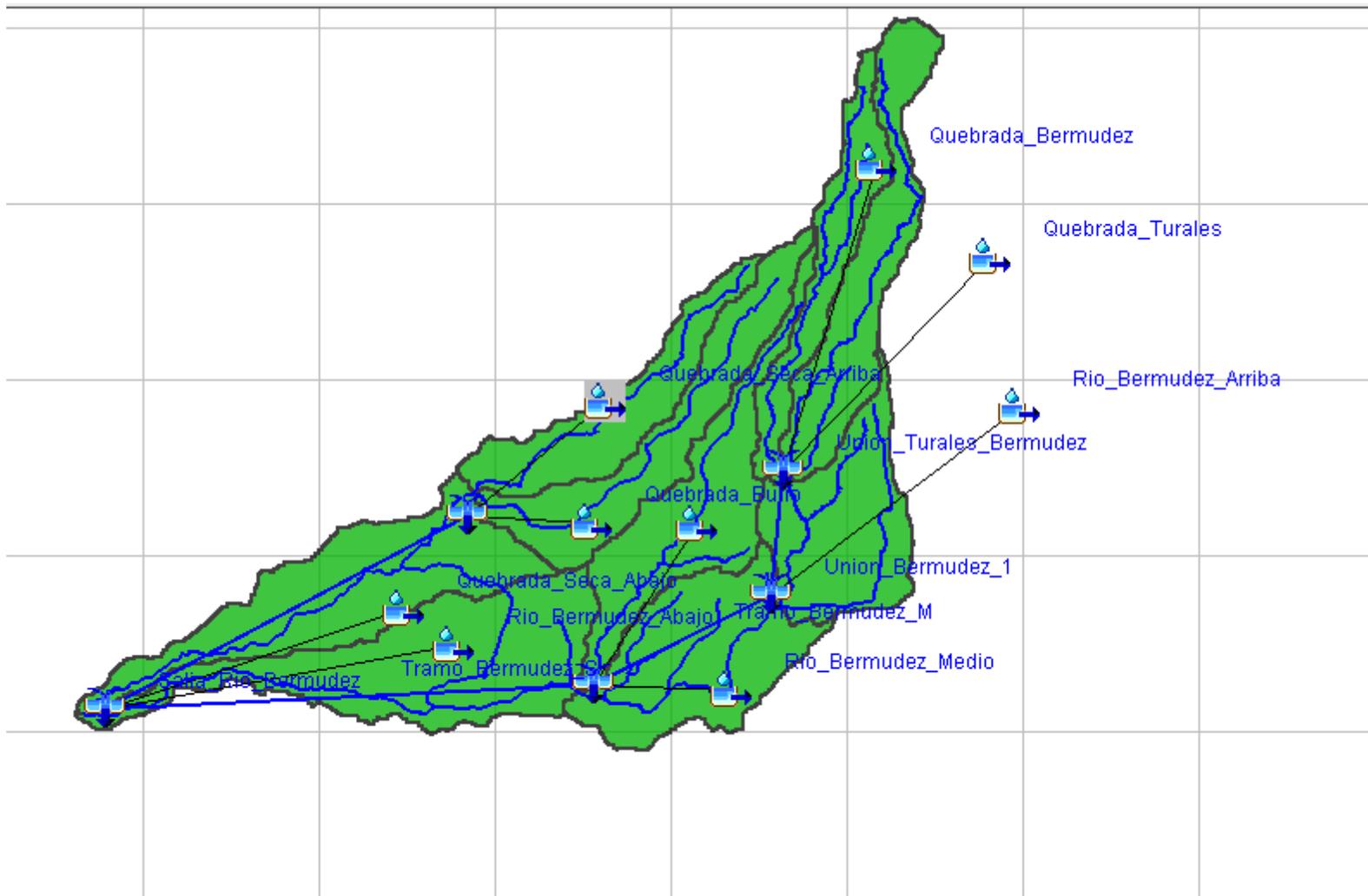


Figura 41. Esquema del modelo hidrológico.

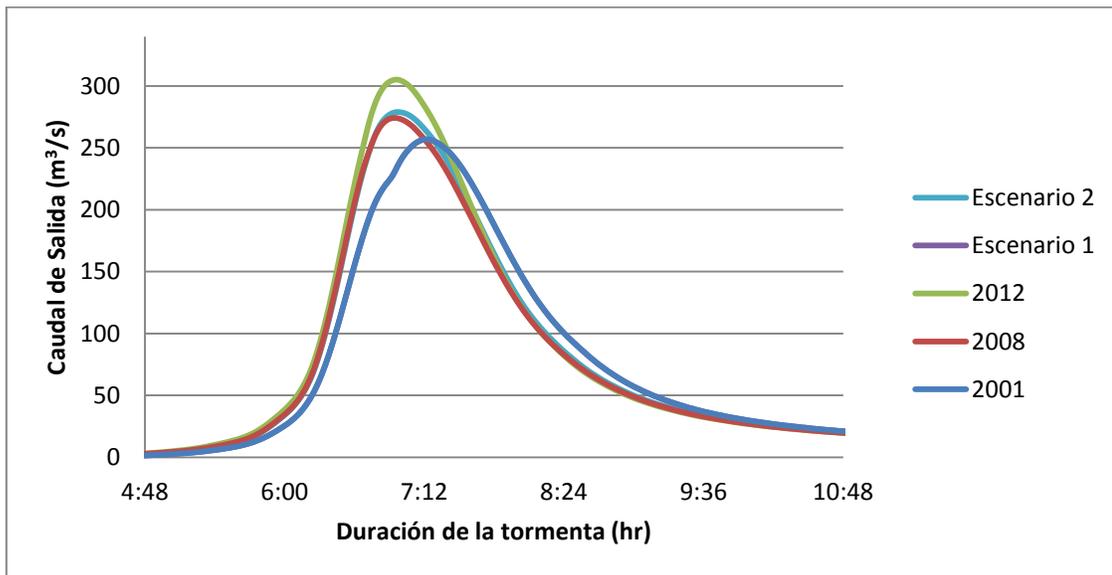


Figura 42. Hidrograma de salida por una lámina de 100 años y 12 horas en Quebrada Seca.

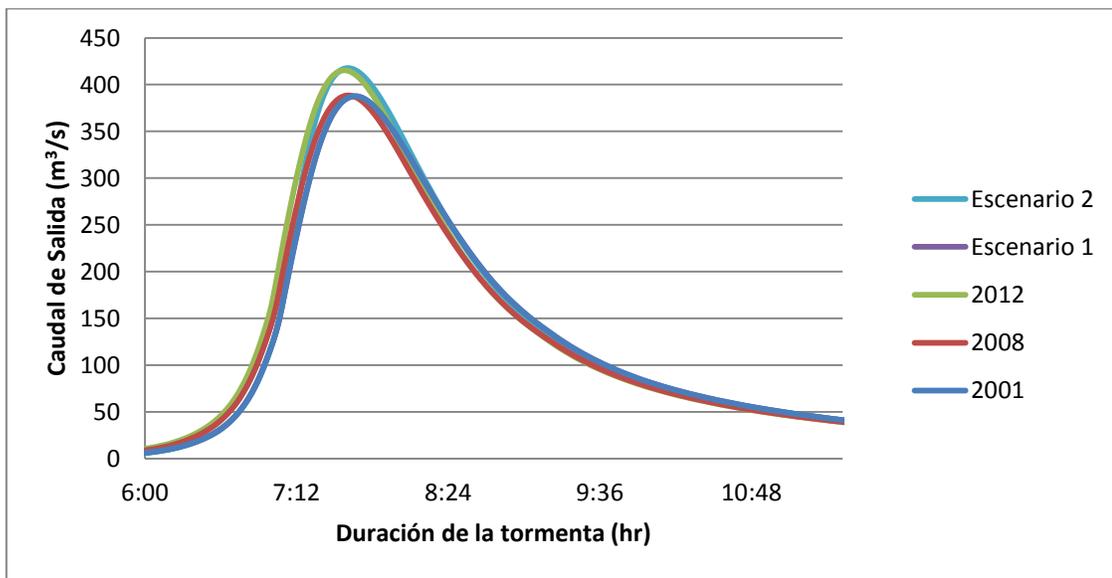


Figura 43. Hidrograma de salida por una lámina de 100 años y 12 horas en Bermúdez.

Tabla 39. Caudales de salida de Quebrada Seca y río Bermúdez.

Uso de Suelo	Periodo Retorno (años)	Caudal (m ³ /s)					
		6 horas		12 horas		24 horas	
		Quebrada Seca	Río Bermúdez	Quebrada Seca	Río Bermúdez	Quebrada Seca	Río Bermúdez
2001	2	87.6	131.9	96	157.3	105.5	175.6
	5	144.3	217.3	157.6	248.1	170.9	278.8
	10	144.3	217.3	200.7	312.5	215.9	338.7
	25	208.3	323.4	256.8	393.1	276.4	439.6
2008	2	90.9	131.1	103.7	156.8	115.4	174.5
	5	151.1	214.3	170.4	245.5	184.7	276.3
	10	192.7	273.7	215.8	308.7	230.8	337.7
	25	216	318.9	274.2	388.4	301.3	435.3
2012	2	109.3	143.1	122.7	170.4	134	187.7
	5	174.8	232.4	194.6	264.9	207.7	294.8
	10	219.3	295.7	243.1	331.7	256.7	357.1
	25	244.9	342.9	305.2	415.8	329.3	460.2
Escenario 1	2	132.1	165	148.6	198.8	160.3	217.6
	5	205	265.5	229.4	305.2	242.2	337.7
	10	253.8	336	283.2	379.9	295.8	407.4
	25	282.6	377.3	351.5	475	376.6	520.9
Escenario2	2	94.7	141.7	107.1	169.3	118.2	186.9
	5	155.6	232.4	174.2	265.5	187.9	294.6
	10	139.5	234.1	220.1	333.1	234.3	355.5
	25	220.8	334.8	279	417.7	303.4	460.3

Tabla 40. Porcentajes de aumento entre años y entre escenarios.

Uso de Suelo	Periodo Retorno (años)	Caudal (m ³ /s)					
		6 horas		12 horas		24 horas	
		Quebrada Seca	Rio Bermúdez	Quebrada Seca	Rio Bermúdez	Quebrada Seca	Rio Bermúdez
2001-2012	2	25%	8%	28%	8%	27%	7%
	5	21%	7%	23%	7%	22%	6%
	10	19%	8%	21%	8%	19%	7%
	25	18%	6%	19%	6%	19%	5%
2012 - Escenario 1	2	21%	15%	21%	17%	20%	16%
	5	17%	14%	18%	15%	17%	15%
	10	16%	14%	16%	15%	15%	14%
	25	15%	10%	15%	14%	14%	13%
2012 - Escenario 2	2	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	10	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	25	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 41. Aumento de caudal cambiando uso de suelo del escenario 1 en Heredia.

	Periodo de Retorno	Caudal (m ³ /s)					
		6 horas		12 horas		24 horas	
		Quebrada Seca	Rio Bermúdez	Quebrada Seca	Rio Bermúdez	Quebrada Seca	Rio Bermúdez
Heredia con Escenario 1	2	2%	3%	2%	3%	2%	2%
	5	2%	2%	2%	2%	1%	2%
	10	1%	2%	1%	2%	1%	1%
	25	1%	1%	1%	1%	1%	1%

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

La clasificación no supervisada género mejores resultados que la supervisada. A pesar de obtener valores casi iguales entre ellos, se comprueba que en algunos casos agrupa erróneamente; las causas de esto posiblemente sean el tamaño de la cuenca y la cantidad de elementos a agrupar en el pixel.

La ecuación de Agencia de Federación de Aviación demostró ser más adecuada en calcular el tiempo de concentración en la cuenca urbana de Quebrada Seca- río Bermúdez, ya que se mediante los coeficientes de escorrentía que logra mostrar condiciones de distintos tipos de usos de suelos.

Con el uso de suelo del 2012, se esperaran caudales de 109 m³/s para Quebrada seca y 143 m³/s para río Bermúdez a un periodo de retorno de 2 años y una duración de 6 horas. De igual manera, se espera 216 m³/s y 342.9 m³/s para un periodo de retorno de 25 años y una duración de 6 horas.

Para un cambio de uso de suelo para el escenario 1, es decir, basado en el crecimiento urbano de los últimos 11 años, se esperan aumentos de caudal de 13 % hasta 21%, dependiendo del periodo de retorno y la duración de la tormenta. Para el cambio de uso de suelo, según los planes reguladores, no se esperan aumentos de caudal ya que las condiciones presentados por ellos mejora la infiltración.

Por si solos, el aumento de zona urbana en los cantones representa aumentos de 1 a 3 %, pero es la expansión en conjunto por parte de los cantones que logra aumentos de hasta 28% en el caudal de la cuenca en los próximos años, según la tendencia del crecimiento urbano.

7.2 Recomendaciones

Fomentar los planes reguladores en las municipalidades de la zona que no los han desarrollado, ya que se comprueba que sus propuestas de uso de suelo mejoran la calidad de la cuenca.

Obtención de cortes transversales en los ríos para generar un modelo hidráulico exacto en la cuenca, principalmente en el río Bermúdez, ya que se desconocen varias de sus características y ha comenzado a presentar similares problemas a la cuenca Quebrada Seca.

Realizar un estudio de socavación en los márgenes de los ríos que puede provocar daños a las casas. De esta manera, localizar las zonas urbanas que requieran de movilización para evitar emergencias en un futuro.

Estudio de contaminantes en la zona; conocer cuánta contaminación acarrea la cuenca. Empleo de metodología de Cargas Diarias Máximas Totales, TMDL por sus siglas en inglés, para determinar cargas contaminantes y calidad de agua debido a industrias.

Realización de mapeo de los acueductos pluviales en la ciudad, para realizar un mejor mapeo de las líneas de drenaje en la parte urbana.

Proteger, de la expansión observa en las imágenes satelitales, las zonas altas de la cuenca para la recarga acuífera.

Colaborar, cuando se realiza un cambio de uso a una urbanización o centro comercial, que el proyecto cuente con un plan de vertido de aguas pluviales, y que la municipalidad pueda inspeccionar su mantenimiento anualmente.

Conservar las zonas verdes como pastos o cafetales dentro de cuenca o ciudad, ya que representan focos de infiltración que pueden disminuir la cantidad de agua que llegue a la zona baja de la cuenca.

Realizar estudios de las condiciones agrícolas en la parte superior de la cuenca, como tipo de agricultura, y las prácticas empleadas en la zona.

Restauración de los ríos, mediante buenas prácticas agrícolas en la parte de arriba, utilizar remediaciones estructurales como el empleo de concreto permeable.

Bibliografía

Campos, E., González, S., & Martínez, E. (2012). Evaluación de peligrosidad y riesgos. *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

Angulo, F. (17 de Junio de 2006). Lluvias afectaron más de 200 casas. *La Nación*.

Astorga, A. (2010). *Estado de la Nación*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2012, de http://www.estadonacion.or.cr/images/stories/informes/017/Armonia/Astorga_Allan_Ordernamiento_territorial_en_Costa_Rica_2010.pdf

Ávila, H., & Karina, S. (2012). REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA EN CUENCAS URBANAS CONSOLIDADAS DE ALTO PORCENTAJE IMPERMEABLE CON TECNOLOGÍAS LID. *CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*.

Berrios, F. J. (2008). *ANÁLISIS ESPACIAL DE HIETOGRAMAS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO*. Chile: Universidad de Chile.

Calderón, P. (1999). *Modelación hidrológica e hidraulica para control de inundaciones en la cuenca del Río Quebrada Seca*. San José: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.

Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. New York: MacGraw-Hill.

Consultora Acón y Asociados. (1991). Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Ric. San José, San José, Costa Rica.

Dams, J., Dujardin, J., Reggers, R., Bashir, I., Canters, F., & Batelaan, O. (2013). Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 485, 84–95. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.09.045

Enrique Campos, S. G. (2012). EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD Y RIESGOS. XXV *CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*.

FRANCISCO, K. e., & ARREDONDO VÍQUEZ, K. F. (2009). *PRUEBAS HIDRÁULICAS EN EL RÍO BURÍO-QUEBRADA SECA*. Heredia.

Gurtierrez, E. (2010). Apuntes de clase computación en la ingeniería.

- Gutierrez, J. (1999). *Sig: Sistemas De Información Geográfica*. Síntesis.
- Hernández, M., López, G., & Richmond, C. (2002). *Análisis de posibles soluciones al problema de las inundaciones, en el cantón de Belén, producto del desbordamiento de la Quebrada Seca*. Taller de Diseño: Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
- ICE, I. C. (2007). *Estudio de Factibilidad para Trasvase*. San José.
- Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., Béal, D., Gagnage, M., Branger, F., ... Braud, I. (2013). Land cover mapping using aerial and VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: Application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485, 68–83. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.028
- Kaufman M., R. D. (2011). *Urban Watersheds, Geology, Contamination, and Sustainable Development*. Boca Raton: CRC Press.
- Marcelino, L. P., & Luis, M. Z. (2013). *Estudio Hidrogeológico Cantón de San Joaquin de Flores, Heredia*. San José, Costa Rica: ProDUS.
- Marín, M. (1991). *Estudio Integral de la Cuenca Quebrada Seca*. San José: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
- Masís, R., & Vargas, H. (2011). *ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DEL USO DE LA TIERRA EN 1960, 1990, 2010 Y SU EFECTO EN EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO BURÍO, HEREDIA, COSTA RICA*. San José: UCR.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú. (s.f.). *MANUAL DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y DRENAJE*. Perú.
- MIVAH. (2012). *Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos*. Recuperado el 2012, de http://www.mivah.go.cr/Documentos/pnot/PNOT_2012-10-22_Aprobada.pdf
- MIVAH. (Noviembre de 2013). <http://www.mivah.go.cr/Documentos/PlanGAM2013/01-DIMENSIONES/Introduccion.pdf>. Recuperado el Febrero de 2014, de MIVAH.
- Moreno, A. (2008). *Sistemas y análisis de la información geográfica*. Mexico: Alfaomega.
- Muñoz, R. C. (2005). *Hidrología Agroforestal*. Madrid, España.

- ProDus. (2013). *Plan Regulador del Cantón de San Joaquín de Flores*. Heredia: ProDus.
- PRUGAM. (17 de Junio de 2007). Recuperado el 2 de Noviembre de 2012, de <Http://201.194.102.38/PRUGAM/Documentos/Propuesta.pdf>.
- Quirós V, J. (2007). *CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PRESENTE EN EL RÍO QUEBRADA SECA EN EL CANTÓN DE BELÉN, HEREDIA*. Heredia: Universidad Nacional.
- Riviera, L. (2002). *Evaluación de la Amenaza y Vulnerabilidad a inundaciones en la microcuenca La Soledad*. Valle los Angeles, Honduras.: CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Ross, A. (24 de Octubre de 2012). Municipalidad de Belén busca solución para desbordamiento de río. *La Nación*.
- Segovia, M. A. (1999). *ESTIMACIÓN DEL VALOR DEL NÚMERO DE CURVA (CN) A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 5 -TM*.
- Segura, L. S. (2004). *Modelación Hidráulica de la Quebrada Seca para el Control de Inundaciones en el Catón de Belén*. Universidad De Costa Rica.
- Serrano, L. (2004). *Modelación Hidráulica de la Quebrada Seca para Control de Inundaciones en el Catón de Belén*. San José: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Agrícola.
- Sexton, J. O., Urban, D. L., Donohue, M. J., & Song, C. (2013). Remote Sensing of Environment Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. *Remote Sensing of Environment*, 128, 246–258. doi:10.1016/j.rse.2012.10.010
- Solano, M. (22 de abril de 1999). Colapso en alcantarillas. *La Nación*.
- Van De Voorde, T., Jacquet, W., & Canters, F. (2011). Mapping form and function in urban areas: An approach based on urban metrics and continuous impervious surface data. *Landscape and Urban Planning*, 102(3), 143–155. doi:10.1016/j.landurbplan.2011.03.017
- Velásquez M., S. (Noviembre de 2011). Apuntes curso Gestión de Recursos Hidrológicos. Cartago, Costa Rica: CATIE.

- Velásquez, S. (Noviembre de 2011). Apuntes de curso Gestión de Recursos Naturales. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Vélvez U., J. J., & Botero G., A. (2011). ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES. *Dyna*, vol. 78, núm. 165,, 58-71.
- Villalobos, e. a. (2007). *ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN DEL SISTEMA HÍDRICO AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ZONA NOROCCIDENTAL DEL GRAN ÁREA METROPOLITANA*. San Jose, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Villón, M. (2004). Hidrología San José: Tecnológico de Costa Rica.
- Villón, M. (2012). *Hidroesta 2*. Cartago, Costa Rica, Costa Rica: MaxSoft.
- Visa, S., Ramsay, B., & Knaap, E. V. (s.f.). Confusion Matrix-based Feature Selection.
- Willems, P. (2012). http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/doc2_29.pdf. Recuperado el 2 de Noviembre de 2012
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49. doi:10.1016/j.rse.2011.02.030
- Wijesekara, G. N., Gupta, a, Valeo, C., Hasbani, J. G., Qiao, Y., Delaney, P., & Marceau, D. J. (2011). Assessing the impact of future land-use changes on hydrological processes in the Elbow River watershed in southern Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 412-413, 220–232. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.018
- Zevenbergen, C. (2010). *Urban Flood Management*. CRC Press
- Zhang, R., & Zhu, D. (2011). Study of land cover classification based on knowledge rules using high-resolution remote sensing images. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 3647–3652. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.019

Anexos

Tabla A1. Faltante de horas Estación Juan Santamaría

1997		1999		2000		2001	
Horas Faltantes	Fecha						
12	12-ago	1	07-abr	1	05-may	24	05-sep
24	13-ago	1	28-may				
24	14-ago	8	29-ene				
24	15-ago	6	06-nov				
2004		2005		2006		2007	
Horas Faltantes	Fecha						
24	11-may	1	16-sep	1	06-ene	1	21-sep
24	12-may			1	12-ene	1	24-sep
				1	28-sep		
				1	21-mar		
2009		2010		2011		2012	
Horas Faltantes	Fecha						
24	01-nov	24	24-jul	17	01-oct	24	20-abr
24	02-nov	24	25-jul	24	02-oct	24	21-abr
24	03-nov	1	09-sep	24	03-oct	24	22-abr
24	04-nov	24	30-sep	24	04-oct	24	23-abr
24	05-nov			24	05-oct	24	24-abr
24	06-nov			24	06-oct	24	25-abr
24	07-nov			24	07-oct	24	26-abr
24	08-nov			24	08-oct	24	27-abr
24	09-nov			24	09-oct	24	28-abr
24	10-nov			24	10-oct	24	29-abr
24	11-nov			24	11-oct	24	30-abr
24	12-nov			24	12-oct	24	01-may
24	13-nov			24	13-oct	24	02-may
24	14-nov			24	14-oct	24	03-may
24	15-nov			24	15-oct	24	04-may
24	16-nov					24	05-may
24	17-nov					24	06-may

24	18-nov					24	07-may
24	19-nov					24	08-may
						3	24-may

Tabla A2. Faltante de horas Estación Santa Bárbara

2002		2003		2006	
Horas Faltantes	Fecha	Horas Faltantes	Fecha	Horas Faltantes	Fecha
1	15-feb	8	07-ene	5	05-feb
3	02-oct	17	18-ene	3	15-mar
3	03-oct	8	29-ene	9	30-dic
6	04-oct			24	31-dic
1	07-oct				
3	05-dic				
24	16-dic				
24	27-dic				
2007		2009		2012	
Horas Faltantes	Fecha	Horas Faltantes	Fecha	Horas Faltantes	Fecha
24	01-ene	7	08-sep	16	12-jul
18	02-ene			24	13-jul
14	04-may	2010		24	14-jul
24	05-may	Horas Faltantes	Fecha	24	15-jul
24	06-may	12	28-nov	24	16-jul
10	07-may			24	17-jul
24	08-sep				

Intensidades máximas

Tabla A3. Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación Juan Santamaría

Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación Juan Santamaría.								
Año	10	30	60	120	240	360	720	1440
1998	86.40	28.80	14.4	7.40	3.70	2.52	2.50	1.43
1999	292.20	97.40	48.7	27.45	15.35	10.52	5.30	2.65
2000	223.80	74.60	37.3	23.10	11.60	8.40	4.20	2.10
2001	290.40	96.80	48.4	24.35	12.30	8.23	4.66	3.08
2002	174.60	58.20	29.1	21.30	13.73	10.03	5.10	2.57
2003	256.80	85.60	42.8	26.35	14.15	10.78	5.55	3.20
2004	233.40	77.80	38.9	30.80	17.55	12.53	7.26	4.77
2005	192.60	64.20	32.1	21.70	12.70	9.42	5.69	2.86
2006	194.40	64.80	32.4	23.10	16.25	11.25	5.63	2.82
2007	300.00	100.00	50	33.85	18.58	12.40	6.20	3.14
2008	286.80	95.60	47.8	26.30	19.43	15.03	9.06	6.25
2009	216.00	72.00	36	21.35	12.25	8.60	4.30	2.64
2010	262.80	87.60	43.8	34.05	24.40	17.82	9.58	6.45
2011	202.80	67.60	33.8	21.90	13.13	8.88	4.44	2.92
2012	198.60	66.20	33.1	18.25	10.48	7.02	3.53	1.80

Tabla A4. Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación San José.

Año	Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación San José.							
	10	30	60	120	240	360	720	1440
1994								
1995	4.02	12.05	24.1	12.4	11.85	7.97	4.38	3.07
1996	5.55	16.65	33.3	19.2	11.93	10.1	5.14	3.28
1997	6.08	18.25	36.5	24.05	14.9	10.07	5.04	2.79
1998	4.15	12.45	24.9	20.05	12.03	8.02	4.09	2.08
1999	4.6	13.8	27.6	26.25	14.18	9.48	4.84	2.95
2000	5.8	17.4	34.8	18.4	11.43	7.62	3.83	1.91
2001	10.15	30.45	60.9	30.45	15.23	10.45	6.39	3.35
2002	6.25	18.75	37.5	20.75	16	11.97	6.43	3.53
2003	7.72	23.15	46.3	27.75	14.4	9.75	5.21	2.71
2004	6.07	18.2	36.4	20.8	12.8	9.82	5.98	3.37
2005	8.73	26.2	52.4	30.05	16.35	14.53	8.37	4.2

2006	6.12	18.35	36.7	28.4	20.43	14.05	7.05	3.59
2007	7.92	23.75	47.5	26.65	15.2	11.1	5.92	3.6
2008	4.33	13	26	19.45	12.48	8.65	5.88	4.45
2009	7.18	21.55	43.1	22.4	13.68	9.77	4.9	2.55
2010	4.48	13.45	26.9	21.25	12.08	8.95	5.1	3.77
2011	4.97	14.9	29.8	24.3	12.18	8.13	4.53	2.34
2012	5.27	15.8	31.6	18.45	10.5	7.1	3.72	1.86

Tabla A5. Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación Santa Bárbara.

Intensidades máximas (mm/hr) Duración minutos. Estación Santa Bárbara.								
Año	10	30	60	120	240	360	720	1440
2001	186.60	62.20	31.1	20.05	10.10	7.05	3.53	1.77
2002	359.40	119.80	59.9	37.00	21.33	14.60	7.30	4.26
2003	268.80	89.60	44.8	26.45	13.75	9.25	4.63	2.52
2004	291.60	97.20	48.6	29.40	15.78	12.82	7.45	4.92
2005	248.40	82.80	41.4	23.85	17.40	12.80	6.48	3.26
2006	328.20	109.40	54.7	30.90	17.25	11.60	5.80	2.91
2007	261.60	87.20	43.6	26.75	15.73	10.67	5.64	3.34
2008	245.40	81.80	40.9	26.60	17.90	13.00	7.23	4.87
2009	388.20	129.40	64.7	35.60	17.83	11.88	5.94	2.98
2010	244.80	81.60	40.8	23.75	13.38	13.45	7.43	5.23
2011	393.00	131.00	65.5	46.00	28.38	19.50	9.75	5.17
2012	522.60	174.20	87.1	51.95	33.63	24.40	12.20	6.11

Tabla A6. Cobertura del suelo en kilómetros cuadrados año 2001.

Uso de Suelo Km²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo
Bosque	0.02	0.15	0.11	0.01	0.64	0.02	0.16	5.23	0.07
Pasto	0.25	0.61	1.50	0.19	1.99	0.04	1.02	3.13	0.62
Cultivo	0.09	0.82	0.42	0.16	2.37	0.14	2.14	6.29	1.16
Suelo descubierto	0.20	0.72	2.10	0.75	6.22	0.22	2.31	4.09	1.10
Industria /Comercio	0.03	0.03	0.47	0.07	2.04	0.00	0.25	0.13	0.19
Urbano	0.20	1.12	2.60	1.09	9.51	0.10	2.45	3.11	1.50
Total	0.78	3.45	7.19	2.26	22.77	0.52	8.33	21.99	4.64

Tabla A7. Área de la cobertura del suelo, año 2008.

Uso de Suelo Km ²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo
Bosque	0.01	0.19	0.16	0.01	0.83	0.02	0.43	6.19	0.29
Pasto	0.03	0.23	0.23	0.04	0.15	0.01	0.23	4.64	0.17
Cultivo	0.00	0.59	0.12	0.05	1.18	0.23	1.97	2.99	1.21
Suelo descubierto	0.30	1.17	2.71	0.74	5.43	0.21	2.55	3.96	1.03
Industria /Comercio	0.06	0.06	0.49	0.07	1.94	0.00	0.28	0.16	0.19
Urbano	0.39	1.21	3.48	1.34	13.21	0.05	2.88	3.19	1.75
Nubes y sombra	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.86	0.00
Total	0.78	3.45	7.19	2.26	22.77	0.52	8.33	21.99	4.64

Tabla A9. Área de la cobertura del suelo, año 2012.

Uso de Suelo Km ²	Alajuela	Barva	Belén	Flores	Heredia	San Isidro	San Pablo	San Rafael	Santo Domingo
Bosque	0.01	0.04	0.05	0.00	0.28	0.01	0.14	4.99	0.08
Cultivo	0.02	0.52	0.28	0.06	1.89	0.19	2.43	4.91	1.05
Industria /Comercio	0.11	0.10	0.80	0.14	3.14	0.01	0.48	0.25	0.43
Pasto	0.03	0.39	0.53	0.06	0.82	0.05	0.69	4.43	0.47
Suelo descubierto	0.29	0.98	2.04	0.70	4.30	0.15	1.71	3.04	0.77
Urbano	0.32	1.41	3.49	1.29	12.35	0.10	2.88	4.37	1.84
Total	0.78	3.44	7.19	2.26	22.77	0.52	8.33	21.99	4.64

Obtención de las ecuaciones para determinar la tendencia de crecimiento impermeable

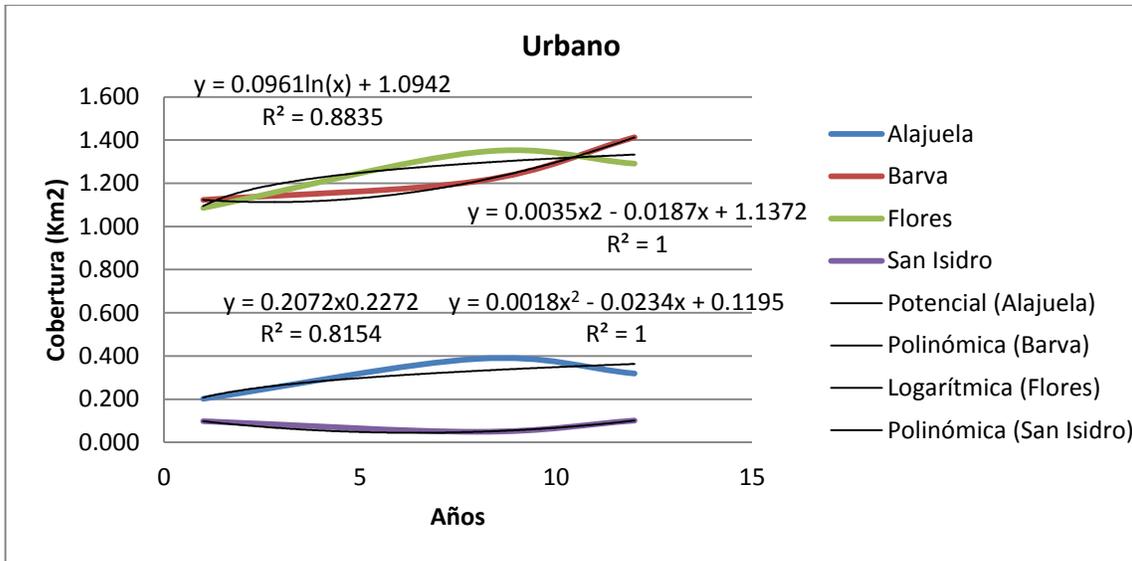


Figura A1. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de crecimiento de suelo Urbano en los cantones de Alajuela, Barva, Flores y San Isidro.

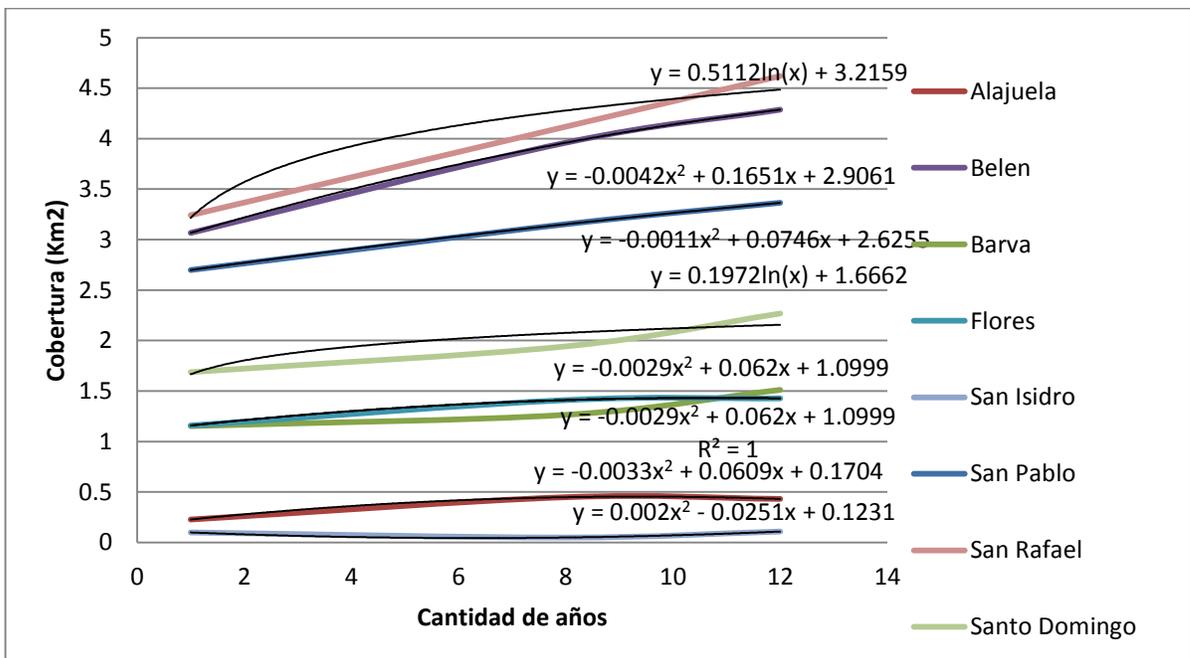


Figura A1. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de crecimiento de suelo Urbano en los cantones de Alajuela, Barva, Belén, Flores, San Pablo, Santo Domingo y San Isidro.

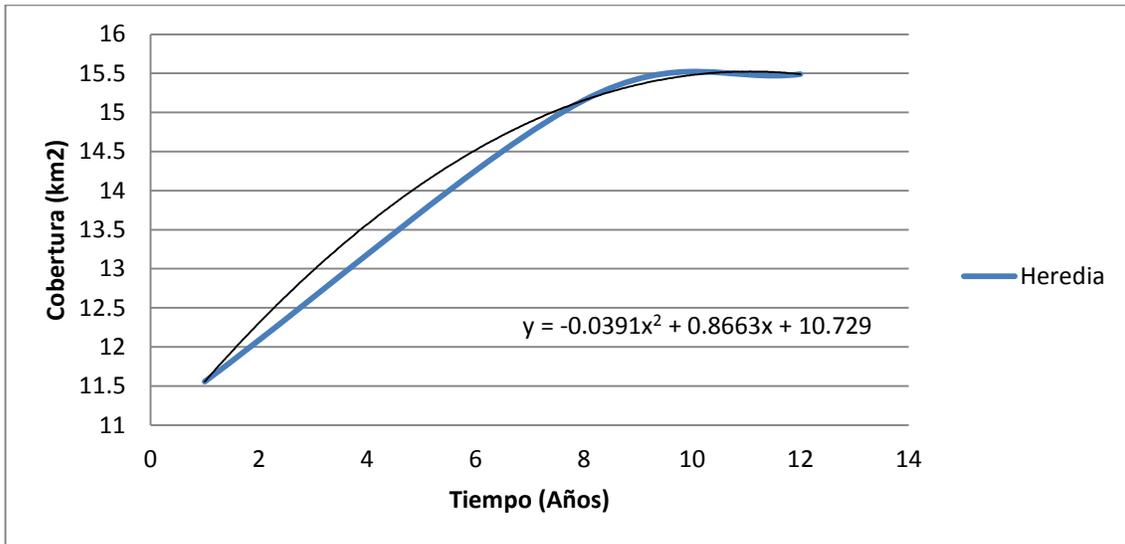


Figura A2. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de crecimiento de suelo impermeable en Heredia.

Curvas y ecuaciones características de las láminas de agua diferentes.

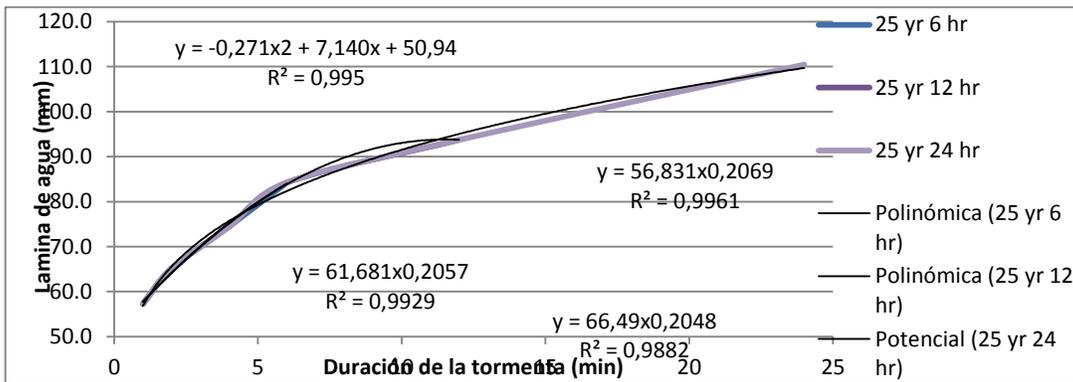


Figura A3. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodos de 2,5 y 10 años con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica San José.

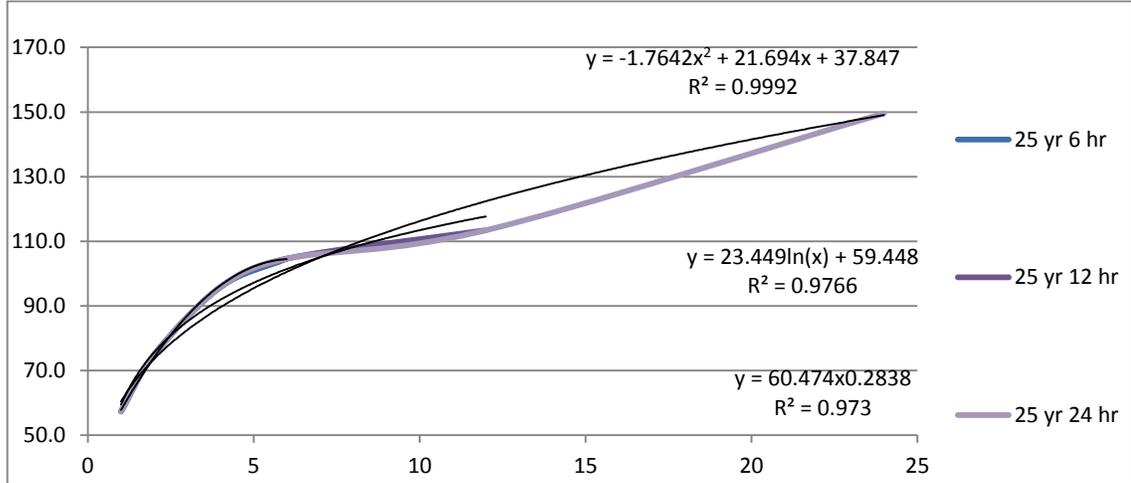


Figura A4 Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodo de 25 con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica Aeropuerto Juan Santa María.

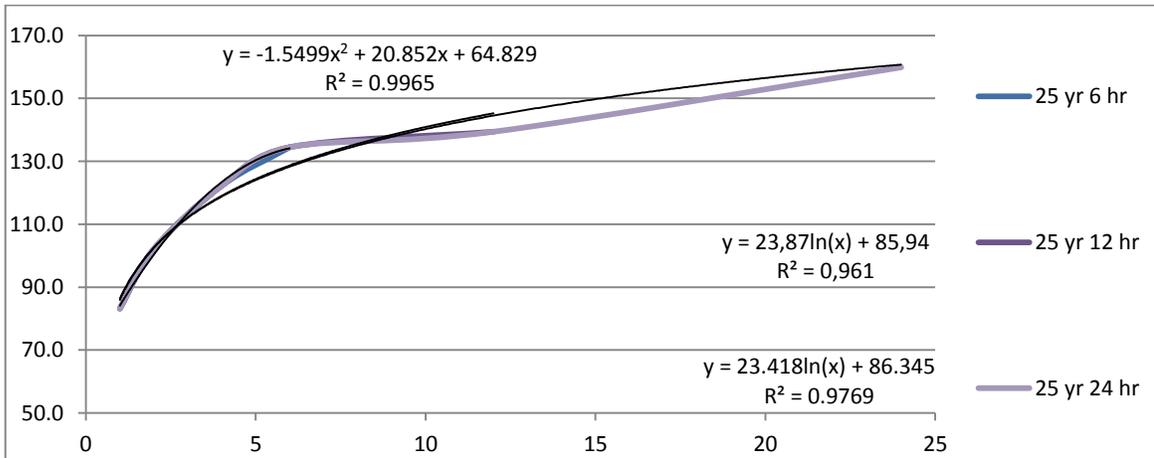


Figura A5. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodo de 25 con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica Santa Bárbara.

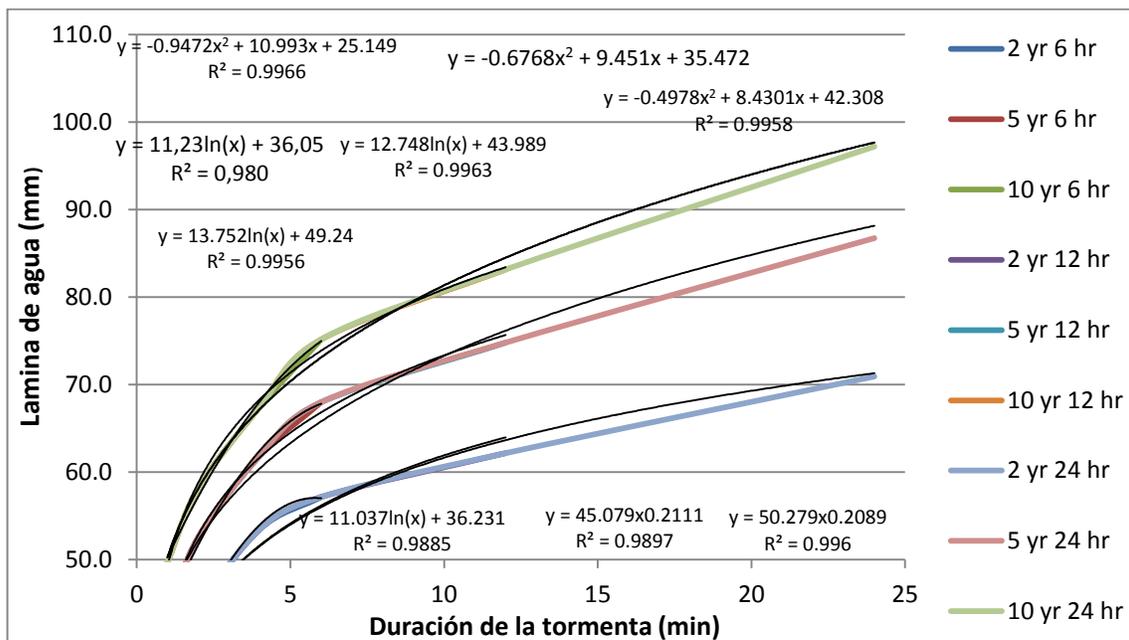


Figura A6. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodos de 2,5 y 10 años con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica San José.

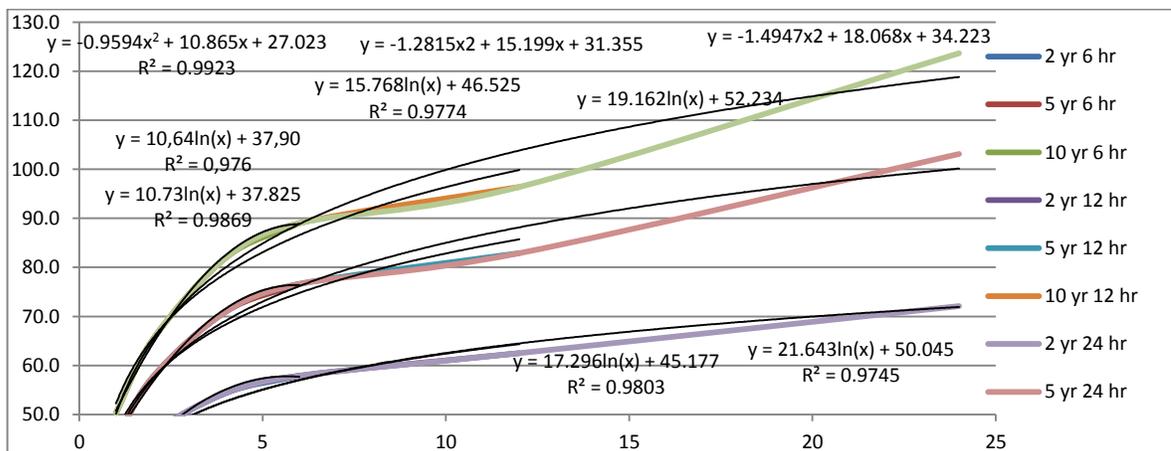


Figura A7. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodos de 2,5 y 10 años con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica Aeropuerto Juan Santa María.

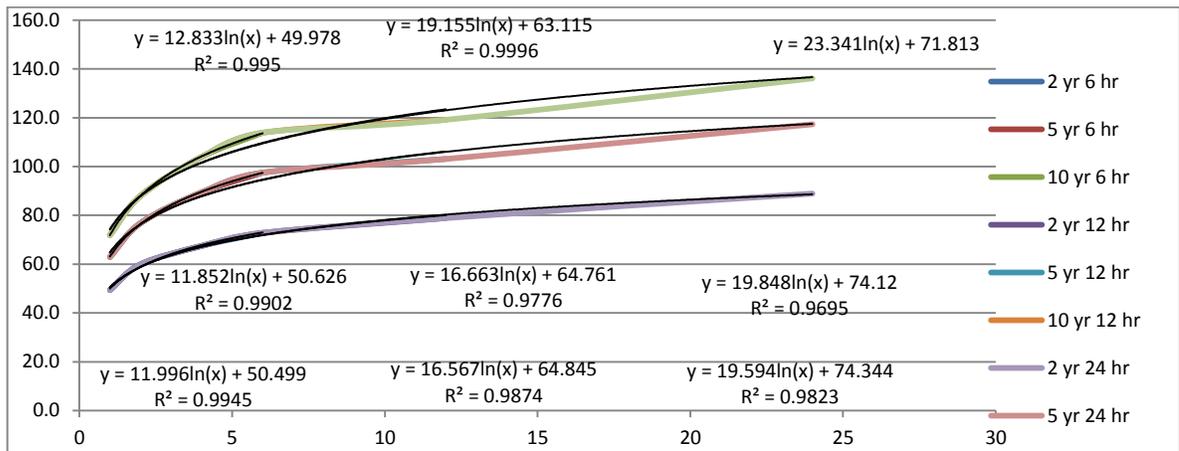


Figura A8. Grafica para determinar las ecuaciones de la tendencia de las láminas de las lluvias en diferentes periodos de retorno y duración. Periodos de 2,5 y 10 años con duraciones de 6, 12 y 24. Estación meteorológica Santa Bárbara.