

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR  
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN CIENCIAS FORESTALES  
CON ÉNFASIS EN MANEJO FORESTAL**

**ZONIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS VERDES PARA  
REDUCIR EL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA Y MITIGAR LA  
VULNERABILIDAD A INUNDACIONES, SUBCUENCA RÍO PÁEZ,  
CARTAGO, COSTA RICA**

**Trabajo final de graduación sometido a consideración del Tribunal Examinador de la  
Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional para optar al grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal**

**Modalidad: Tesis de Grado**

**KEVIN ALONSO ALFARO-JIMÉNEZ**

**Heredia, Costa Rica**

**Junio, 2018**

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con énfasis en Manejo Forestal.

## MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

.....  
M.Sc. Tomás Marino Herrera  
Decano de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

.....  
M.Sc. Virya Bravo Durán  
Directora de la Escuela de Ciencias  
Ambientales

.....  
M.Sc. Pablo Ramírez Granados  
Tutor

.....  
M.Sc. María Álvarez Jiménez  
Lectora

.....  
Ph.D. Isabel Guzmán Arias  
Lectora

.....  
Kevin Alonso Alfaro-Jiménez  
Postulante

## **DEDICATORIA**

Como mínimo gesto de gratitud dedico la presente Tesis,

### **A Dios,**

Por darme su infinita bondad y amor, por la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por poner en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio, por permitirme llegar hasta este punto y darme salud para lograr mis objetivos.

### **A mis padres,**

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

### **A mi maestro,**

M.Sc. Pablo Ramírez Granados por su gran apoyo y motivación constante, que me impulsó a siempre dar un paso más allá, por sus palabras que alentaron mis expectativas, por las oportunidades y confianza brindada que me han permitido enfrentar nuevos retos.

## **AGRADECIMIENTOS**

De manera formal quiero agradecer al Fondo para el Fortalecimiento de las Capacidades Estudiantiles en Investigación de la Universidad Nacional (FOCAES), por el apoyo económico brindado para concluir con la presente Tesis.

Agradezco sinceramente a todos mis maestros que motivaron mi desempeño e incentivaron a superarme en este proceso de mi vida. De manera más enfática quiero señalar un profundo agradecimiento a mis lectoras de tesis M.Sc. María Álvarez Jiménez y Ph.D. Isabel Guzmán Arias y en especial a mi tutor de tesis M.Sc. Pablo Ramírez Granados, por asumir sus responsabilidades en su papel de lectores y tutor, más que eso por aconsejarme, guiarme y apoyarme como lo hicieron.

Calurosamente quiero agradecer a mis padres por su tiempo, esfuerzo, apoyo y motivación brindada durante este proceso académico y en general en mi vida. Gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme en cada largo y agotador día de trabajo; gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida. Ustedes son los promotores de mis sueños.

## RESUMEN

La alteración de más de un tercio de los ecosistemas terrestres ha desequilibrado la capacidad reguladora y estabilizadora del medio ambiente, acrecentando la vulnerabilidad a inundaciones en ambientes urbanos y periurbanos. El manejo forestal ha avanzado en prácticas silviculturales que aprovechan la capacidad de regulación hídrica que poseen las estructuras vegetales. La infraestructura verde (IV) es un enfoque de restauración de áreas urbanas y periurbanas, el cual integra la multifuncionalidad del paisaje y aprovecha las propiedades de la vegetación, para mejorar la capacidad de retención de la cuenca hidrográfica. El estudio presenta una metodología novedosa, para la determinación de zonas de desarrollo de IV, con el fin de reducir el volumen de escorrentía y mitigar las inundaciones en la subcuenca del río Páez, Cartago, Costa Rica. Dicha determinación se realizó mediante procesos de análisis espacial, la caracterización morfométrica-biofísica con base en las curvas de nivel (1:10 000) y la digitalización de ortofotos. El efecto de las IV sobre la escorrentía superficial del paisaje se verificó con el modelado hidrológico en el programa Iber 2.4.3, utilizando datos de precipitación de diseño y caudal máximo obtenido con el método del número de curva desarrollado por el SCS de los Estados Unidos. Los escenarios de IV propuestos redujeron a escala de subcuenca la escorrentía y caudal máximo entre un 14% y 5% de la entrada de lluvia en el esce-1 y esce-2, respectivamente. A escala de microcuenca fueron más permisibles los efectos de las IV sobre la hidrología del paisaje, las microcuencas más vulnerables (microcuencas 11, 12 y 0), reducirían la escorrentía hasta un 44%, 6% y 14%, respectivamente, generando una menor vulnerabilidad a inundaciones. La metodología propuesta muestra una zonificación de la IV que genera una reducción de la escorrentía y los niveles del caudal máximo, mitigando la vulnerabilidad a inundaciones.

# CONTENIDO

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
I. INTRODUCCIÓN .....	10
II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	12
III. JUSTIFICACIÓN.....	13
IV. ANTECEDENTES.....	15
V. OBJETIVOS .....	20
Objetivo General .....	20
Objetivos Específicos .....	20
VI. HIPÓTESIS.....	20
VII. ÁREA DE ESTUDIO.....	21
VIII. MARCO TEÓRICO .....	25
1. Vulnerabilidad.....	25
2. Contextualización de la Vulnerabilidad a Inundaciones .....	26
3. El paisaje y la cuenca hidrográfica como unidad de manejo del paisaje .....	28
4. Morfometría en el contexto de cuenca hidrográfica.....	31
4.1. Parámetros morfométricos en relación con la escorrentía e inundaciones .....	32
4.1.1. Parámetros de Forma .....	33
4.1.2. Parámetros de Drenaje.....	35
4.1.3. Pendiente .....	36
4.1.4. Tiempo de concentración.....	36
4.1.5. Orientación .....	37
4.1.6. Curvatura .....	37
5. Infraestructuras Verdes (IV).....	39
5.1. Impacto de las IV en la escorrentía superficial del paisaje urbano y periurbano .....	42
5.2. Rol del componente forestal en la cuenca hidrográfica.....	46
5.3. Efecto de arbolado en la escorrentía superficial del paisaje urbano y periurbano .....	48
IX. MARCO METODOLÓGICO .....	51
1. Objetivo 1. Caracterización morfométrica y biofísico de la subcuenca .....	51
1.1. Delimitación de las microcuencas y obtención de datos geoespaciales .....	51
1.2. Cuantificación de Parámetros morfométricos .....	52

1.2.1.	Parámetros de forma.....	52
1.2.2.	Parámetros de drenaje.....	53
1.2.3.	Pendiente .....	54
1.2.4.	Tiempo de concentración.....	56
1.3.	Grado de conflictividad del uso de la tierra en las áreas de protección.....	56
1.3.1.	Determinación del uso actual de la tierra.....	56
1.3.2.	Determinación de las Áreas de Protección.....	56
1.3.3.	Zonificación de conflicto de uso de la tierra en las AP.....	57
2.	Objetivo 2. Determinación de zonas con mayor grado de vulnerabilidad a crecidas e inundaciones.....	60
2.1.	Grado de vulnerabilidad de las microcuencas.....	60
2.2.	Zonas de mayor vulnerabilidad a inundaciones .....	62
2.2.1.	Orientación.....	62
2.2.2.	Curvatura.....	63
3.	Objetivo 3. Ubicación de áreas potenciales de I.V. urbanas .....	65
3.1.	Áreas Verdes (AV).....	66
3.2.	Arbolado Urbano Público (AUrP).....	67
4.	Objetivo General. Determinación de zonas de I.V., para reducción del volumen de escorrentía y mitigación de la vulnerabilidad a inundaciones.....	68
4.1.	Determinación de zonas para el desarrollo de IV .....	68
4.2.	Modelado hidrológico .....	73
4.2.1.	Datos de hidrodinámica .....	73
4.2.2.	Polígonos de uso de la tierra (para determinar la rugosidad de los polígonos en las secciones de interés).....	75
4.2.3.	MED (para interpretar la topografía del terreno) .....	75
X.	RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	76
1.	Objetivo 1. Caracterización morfométrica-biofísica.....	76
2.	Objetivo 2. Determinación de zonas con mayor vulnerabilidad a inundaciones .....	89
3.	Objetivo 3. Ubicación de áreas potenciales para IV urbana.....	95
4.	Objetivo General. Determinación de zonas de IV para reducir el volumen de escorrentía y mitigar la vulnerabilidad a inundaciones .....	98
XI.	CONCLUSIONES.....	114
XII.	RECOMENDACIONES .....	116
XIII.	ALCANCES DE LA TESIS.....	118
XIV.	REFERENCIAS .....	119

## Tabla de Cuadros

Cuadro 1. Estudios referidos al impacto de las IV sobre la hidrología del paisaje .....	43
Cuadro 2. Procedimiento para obtener los datos geoespaciales .....	51
Cuadro 3. Descripción de los parámetros de forma .....	53
Cuadro 4. Descripción de los parámetros de drenaje .....	54
Cuadro 5. Consideraciones para definir las AP .....	56
Cuadro 6. Procedimiento para definir las AP de la red de drenajes .....	57
Cuadro 7. Procedimiento para la zonificación del conflicto de uso del suelo .....	58
Cuadro 8. Interpretación, escala y valor de cada parámetro del grado de vulnerabilidad .....	61
Cuadro 9. Variables consideradas en el índice de %IZV .....	67
Cuadro 10. Procedimientos de toma de datos del AURP .....	68
Cuadro 11. Insumos requeridos para la determinación de zonas para el desarrollo de IV .....	70
Cuadro 12. Procedimiento para la determinación de zonas para el desarrollo de IV .....	71
Cuadro 13. Valores seleccionados para definir N y coeficiente de manning .....	74
Cuadro 14. Área y porcentaje de cada uso de la tierra definido en la subcuenca del río Páez .....	77
Cuadro 15. Parámetros morfométricos-biofísico subcuenca río Páez y promedios subcuenca, sección alta, media y baja .....	79
Cuadro 16. Parámetros morfométricos-biofísico por microcuenca de la subcuenca río Páez .....	80
Cuadro 17. Valores obtenidos en las variables del índice de %IZV y resultado de este por AV .....	96
Cuadro 18. Superficie de AV urbanas identificadas en la subcuenca río Páez .....	97
Cuadro 19. Variables del AURP censado en la comunidad de Cot y Paraíso, subcuenca río Páez .....	97
Cuadro 20. Porcentaje de superficie de cada polígono de uso de la tierra y porcentaje de disminución de la escorrentía base por escenario de I.V. propuesto, subcuenca río Páez .....	104
Cuadro 21. Porcentaje de superficie de cada polígono de uso de la tierra y porcentaje de disminución de la escorrentía base por escenario de I.V. propuesto, subcuenca río Páez .....	105

## Tabla de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica y administrativa de la subcuenca del Río Páez .....	22
Figura 2. Amenazas presentes en la subcuenca del río Páez y zonas aledañas .....	24
Figura 3. Efecto de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento .....	34
Figura 4. Forma esperada del hidrograma a la salida de una cuenca de acuerdo a los parámetros de forma ...	34
Figura 5. Los dos mecanismos de acumulación .....	38
Figura 6. Morfología cóncava y convexa del punto analizado .....	39
Figura 7. Criterio de compensación de áreas, pendiente del cauce .....	55
Figura 8. Criterio de Alvord, variables e interpretación .....	55
Figura 9. Diagrama del procedimiento para la zonificación de los conflictos de uso de la tierra en AP .....	59
Figura 10. Ventana de distribución de letras por cada celda .....	63
Figura 11. Pasos del algoritmo para calcular la orientación de la superficie .....	63

Figura 12. Diagrama de enumeración de los valores de elevación de la ventana.....	64
Figura 13. Uso actual de la tierra de la subcuenca río Páez.....	77
Figura 14. Rangos de GV por microcuenca de la subcuenca río Páez.....	79
Figura 15. Parámetros morfométricos de forma por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja....	83
Figura 16. Parámetros morfométricos de drenaje por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja .	85
Figura 17. Valor de la pendiente (%) por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja.....	87
Figura 18. Valor de Tc (min) por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja.....	88
Figura 19. Valor de la GC por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja.....	89
Figura 20. Valor de GV por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja.....	90
Figura 21. Orientación (°) de las pendientes en la subcuenca río Páez.....	92
Figura 22. Curvatura de la superficie en la subcuenca río Páez.....	93
Figura 23. Zonas más vulnerables a inundaciones en la subcuenca río Páez.....	94
Figura 24. I.V. identificada en la comunidad de Paraíso de Cartago, subcuenca río Páez.....	97
Figura 25. I.V. identificada en la comunidad de Cot de Oreamuno, subcuenca río Páez.....	98
Figura 26. Escenario base (Esce-B), subcuenca río Páez.....	99
Figura 27. Escenarios de intensificación de I.V. propuestos (Esce-1, 2 y 3), subcuenca río Páez.....	101
Figura 28. Modelado del caudal, sección micro 0, catarata Los Novios.....	111
Figura 29. Modelado del caudal, sección micro 11, quebrada Lavatripas.....	112
Figura 30. Modelado del caudal, sección micro 12, quebrada Pollo.....	113

## Tabla de Anexos

Anexo 1. Número de curva “N” para complejos hidrológicos de suelo cobertura (para condiciones de humedad antecedente II).....	130
Anexo 2. Gasto unitario “q” ( $m^3/s/mm/km^2$ ), en función del tiempo de concentración (Tc) en horas.....	130
Anexo 3. Árboles censadas en la comunidad de Cot y Paraíso, subcuenca río Páez.....	131

## I. INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de la tierra, la presión demográfica, la inadecuada planificación urbana y el cambio climático (CC), que afecta los patrones meteorológicos, han aumentado la vulnerabilidad a las inundaciones (PREVDA et al, 2008; Abhas, Bloch & Lamond 2012; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2015). Las actividades agrícolas, ganaderas y forestales cunifican una alteracion de más de un tercio de los ecosistemas terrestres (Sanchun et al., 2016), causando desequilibrios en la capacidad reguladora y estabilizadora del medio ambiente (Kauffman & Brant, 2000; Sanchun et al., 2016), donde los ambientes altamente urbanizados son especialmente vulnerables a los fenómenos hidrometeorológicos, el Vigésimo primer Informe del Estado de la Nación señala que en el periodo 1985-2013 se dieron 3 829 incidentes relacionados con dichos fenómenos en el Valle Central de Costa Rica (Ledezma, 2009b; Arce, 2004). La escorrentía superficial es un factor significativo en la vulnerabilidad a inundaciones, que afecta principalmente los centros urbanos, debido a la alta impermeabilidad del paisaje, que genera pérdidas de precipitación en escorrentía superficial desde un 40% hasta un 83%, a diferencia de los bajos porcentajes de los paisajes forestales (13%; Bonan 2002).

Los paisajes forestales presentan una alta captación de escorrentía superficial, a diferencia de los urbanizados (Bonan 2002), reconociéndose que la vegetación favorece el control de la erosión, incrementa la infiltración, reduce la escorrentía, ofrece protección física al suelo frente al impacto de la lluvia y reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno (Hudson, 1982; García 2007; FAO 2013a). Todo esto impulsó a la silvicultura, como disciplina, ha generar avances en las capacidades del manejo forestal para aprovechar el potencial de regulación hídrica de los árboles en integración con otras estructuras vegetales y artificiales (Roy, Byrne y Pickering 2012; FAO 2013a), surgiendo nuevas tendencias como la silvicultura adaptativa, hidrológica y urbana (Pique & Vericat, 2014; Sist, Gourlet-Fleury, & Nasi, 2011; Sánchez & Navarrete, 2017; Montes 2014; Puettmann et al, 2016; Günter et al, 2012).

Un nuevo enfoque que posee una visión más holística de restaurar áreas urbanas y periurbanas, son las *Infraestructuras Verdes* (IV), las cuales se caracterizan por integrar el concepto de multifuncionalidad del paisaje (Mell 2008) y recientemente se han convertido en una estrategia de gestión de aguas residuales y aguas pluviales (Fletcher et al, 2015), al aprovechar las propiedades

del suelo y la vegetación, para mejorar la capacidad de retención de la cuenca hidrográfica (Berland et al., 2017; Roy, Byrne y Pickering 2012). Las ciudades que experimentan inundaciones y peligros hídricos (Yao et al., 2015) y en general aquellas que consideran restaurar el capital natural urbano-periurbano (Puettmann et al., 2016), para enfrentar los efectos del CC, han generado gran cantidad de investigaciones referidas al impacto de las IV sobre la escorrentía superficial del paisaje (Berland et al., 2017; Fletcher et al, 2015, González-Sosa et al., 2017).

El análisis morfométrico que muestra cuantitativamente las características físicas de la cuenca (Kumar-Rai et al. 2017; Strahler 1964), se ha relacionado con los eventos hidrometeorológicos para comprender y cuantificar los riesgos ambientales, en especial los vinculados con los procesos de las escorrentías superficiales (Méndez 2016; Ajibade et al., 2010). Los procesos de escorrentía, crecidas e inundaciones se han relacionado con parámetros morfométricos (Patton 1988; Karalis et al., 2014; Kumar-Rai et al., 2017), sin embargo, para tener una mejor comprensión de los mecanismos de inundación es necesario tener en cuenta otras características naturales de la cuenca: como el uso de la tierra, la cobertura de la tierra y la geología, que poseen una significativa influencia sobre el hidrograma de captación de una cuenca (Ahmad, Ahmad & Rashid, 2012).

En el presente estudio se realiza la determinación de zonas para el desarrollo de IV, con el fin de reducir el volumen de escorrentía y mitigar la magnitud de las inundaciones. Se presenta la unidad cuenca hidrográfica como unidad de gestión natural, con sus características morfométricas y biofísicas, modelado de la hidrología y consideración de la implementación IV como mecanismos para reducir la escorrentía y la vulnerabilidad a inundaciones. La zona de estudio es la subcuenca del río Páez, ubicada en Oreamuno y Paraíso de Cartago, y dedicada principalmente a la agricultura de hortalizas y pastizales (Tencio, 2013; Ledezma, 2009a), área en la cual existen reportes de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) sobre la vulnerabilidad a flujos de lodo, cabezas de agua e inundaciones repentinas asociadas a lluvias intensas o fenómenos hidrometeorológicos combinados (Vallejos, Esquivel, & Hidalgo, 2012; PREVDA, Nacional, & Europea, 2008).

## II. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La interacción de los aspectos urbanos, ecosistémicos, hidrológicos e hidráulicos del territorio (Hansen & Pauleit, 2014; Hamin & Gurrán, 2009) se ha vuelto un tema importante en las agendas de los países del mundo. El aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos (Retana, 2012; Alfaro & Quesada, 2010), ocasionan importantes daños sociales, económicos y ambientales, en especial en las ciudades, donde los efectos son más evidentes y percibidos por las personas y las naciones (Yao et al., 2015), creando la necesidad de promoción de proyectos e iniciativas de rehabilitación de áreas, que enmarque soluciones sostenibles para los problemas en general del CC, sin limitar el desarrollo de las comunidades.

Las iniciativas de IV, pese a que han tomado un rumbo principalmente hacia la conservación de la biodiversidad y paisajismo (Conejero 2011; Haines-Young, Potschin, & Kienast 2012; Peng, Chen, Liu, Lu, & Hu 2016; Benito 2014; Guerrero & Culos 2007), recientemente han adquirido un rol importante en las estrategias de gestión de aguas residuales y aguas pluviales (Fletcher et al., 2015), abordando su aplicación en la disminución de la escorrentía y mitigación de la vulnerabilidad a inundaciones (Leitao, Miller, Ahern, & McGarigal, 2006; Brody et al., 2013; Woo y Park 2016). Ante estas ideas surgen los cuestionamientos de la investigación: ¿Cómo impactan las IV en la escorrentía del paisaje? ¿Cómo relacionar la morfometría de cuencas hidrográficas con los estudios del paisaje, para crear paisajes más resilientes a eventos hidrometeorológicos?, focalizando en una pregunta de investigación general, pero esencial para orientar el presente estudio: ¿Cómo se pueden determinar zonas para el desarrollo de IV que permitan reducir la escorrentía de aguas pluviales y mitigar las inundaciones? Tomando la palabra de autores como Leitao et al., (2006), que argumentan que una red ecológica (en términos de importancia ecológica) podría aportar información útil para la planificación, la conservación y la preservación de los espacios naturales, manteniendo un equilibrio entre las zonas desarrolladas y no desarrolladas dentro de un paisaje particular y el de Molina (2007) quien señala que mediante el análisis de la geomorfología y la trama urbana, complementado con investigaciones sobre la silvicultura urbana, corredores verdes, valoración de remanentes naturales, las franjas de protección, los huertos urbanos y la granja urbana; permitirían crear una estructura verde urbana conectada y sostenible, para mejorar la calidad ambiental y atenuar los efectos del CC en las ciudades.

### III. JUSTIFICACIÓN

Las inundaciones son responsables de más de un tercio del total de costos debido a desastres y de dos tercios de las personas afectadas por desastres naturales en el mundo (Jonkman & Kelman, 2005; Jonkman, 2005). Cuando sucede un evento que causa pérdidas a nivel de infraestructura se produce una afectación a nivel económico global en relación con la pérdida de competitividad del país, asociado al atractivo por invertir y a las pérdidas en las actividades económicas que resultan afectadas (Retana, 2012), por ejemplo, durante el período 2005-2009 en promedio las pérdidas representaron un 0,78% del PIB (cifra que representó el 18,34% del gasto de capital), lo que significa que en los últimos años gran parte de la inversión pública se ha destinado a reponer el capital físico destruido por eventos hidrometeorológicos (Alfaro, 2011). Además, se estima un aumento entre un 5% a 10% en la intensidad y frecuencia de estos eventos hidrometeorológicos (Retana, 2012; Alfaro & Quesada, 2010), lo cual para un país tropical como Costa Rica, donde el 59,4 % de los desastres corresponden a inundaciones (sin sumar otro porcentaje importante asociado a avenidas torrenciales, lluvias intensas, deslizamientos, entre otros; Cubero & Carvajal, 2014), significa un importante inconveniente por resolver.

Estas dimensiones espaciales y temporales impulsaron las actuales preocupaciones nacionales sobre cómo disminuir los efectos en general del CC, generando un gran interés por la restauración o rehabilitación de áreas (como se ha realizado en cuencas cercanas a la del río Páez, por parte de comisiones como COBIRRIS y COMCURE). El planteamiento de alternativas que integren los aspectos urbanos, ecosistémicos e hidráulicos del territorio (Hansen & Pauleit, 2014; Hamin & Gurrán, 2009) es cada vez más necesaria, destacando a nivel internacional (principalmente Europa y Norte América) la promoción de las IV como una alternativa para crear paisaje más resilientes y con una visión más holística de percibir las áreas y técnicas para rehabilitar paisajes (urbanos y periurbanos).

La necesidad de crear paisajes más resilientes es quizá el principal justificante del presente estudio, al proporcionar evidencia empírica y novedosa para los responsables de la formulación de políticas, en el sentido de promover la importancia de la interconexión y conglomerados de IV y planificar centros y corredores estratégicos verdes para gestionar más eficazmente las escorrentías de aguas pluviales y mitigar la vulnerabilidad a inundaciones. Además, el estudio al enmarcarse dentro del proyecto 0138-16 denominado “*Caracterización biofísica, morfométrica e hidrológica para*

*proponer acciones de manejo de recursos hídricos en la subcuenca del río Páez, Cartago*” del Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, de la Escuela de Ciencias Ambientales, adquiere un mayor peso y justificación, al constituir un aporte importante en investigación técnica y científica al mismo.

#### IV. ANTECEDENTES

Desde el año 2000, se inició la ejecución del Plan de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (PMCR), el cual abarca la parte alta y media de la cuenca de tal río, donde se ubica la subcuenca en estudio, con el objetivo de mantener la continuidad, la calidad y cantidad del recurso hídrico de la cuenca (SEPSA, 2015). Como parte del proceso se creó el Centro de Servicio Gestión Ambiental y Cuencas (CSGAC), el cual ha permitido una alianza estratégica entre ICE-MAG, el plan se desarrolla por medio de cuatro programas, a saber (SEPSA, 2015):

1. Producción agrosilvopastoril sostenible, el objetivo general es apoyar actividades de desarrollo sostenible de tipo agrícola pecuario y forestal mediante la participación directa de las comunidades en la aplicación de sistemas agroforestales, silvopastoriles y agricultura conservacionista con énfasis en conservación de suelos y aguas en fincas.
2. Manejo de la Cobertura Vegetal, consiste en apoyar actividades que involucren la conservación, protección e incremento de los bosques protectores de la cuenca y de manejo conservacionista de las zonas de amortiguamiento de las áreas protegidas.
3. Rehabilitación de Cauces y Control de Sedimentos, el objetivo general es prevenir la profundización acelerada de los cauces de los ríos y quebradas, así como protección de puentes mediante obras de control de torrentes, básicamente umbrales.
4. Educación Ambiental, se trata de fomentar un cambio de actitud de la población de la cuenca en su forma de valorar y aprovechar los recursos naturales, dando énfasis al trabajo con grupos de jóvenes y niños/as dentro de esquemas de educación formal e informal.

También se han presentado otras acciones por parte del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), en el sentido de manejo de cuencas hidrográficas, apoyando una serie de proyectos de conservación de suelos en la parte alta de Cartago, mediante acciones como entrega de árboles de aguacate (*Persea americana*), higo (*Ficus carica*) y otros forestales, además de equipo de labranza como palines, rastra rotativa, materiales para la construcción de lombricomposteras y biodigestores, además de apoyo de otro tipo para proyectos agro-conservacionista (SEPSA, 2015).

A nivel local de la subcuenca en estudio se ha afirmado por parte de Solano (2002) que la misma presenta problemas de conducción de aguas de escorrentía, señalando a) la fuerte intensidad de

lluvias, que rompe gran cantidad de obras de infraestructura parcelaria de conservación, arrastra los suelos y cultivos e inunda amplios sectores de las tierras de labranza y la carretera nacional Volcán Irazú en los meses de mayo, octubre y noviembre, b) la distribución de tierras y la intensidad de su uso provocó el cierre de los cauces naturales de drenaje, c) los desagües de las fincas con frecuencia se construían a favor de pendiente, d) las salidas de las aguas de cada finca no tienen un ordenamiento que beneficie al conjunto de fincas, e) las alcantarillas taqueadas interrumpen el paso de las aguas, y i) la deforestación de la zona favorece la destrucción de los suelos y cultivos, por escorrentía y efectos de erosión. Registros de Villalobos (1988; Solano 2002) indican tasas de erosión superiores a  $100 \text{ tm}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , para la Zona Norte de Cartago, además en el estudio de Capacidad de Uso de la Tierra para la planificación de fincas realizado por Marín et al (1997 en Solano, 2002), se encontraron áreas con 30 cm o menos de capa arable (siendo lo usual que esta mida 1 m o más), estimándose que en menos de 80 años se podría perder la capa arable del suelo (Villalobos, 1988).

Ante ello a partir de 1995 el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Agencia de Servicios Agropecuarios de Tierra Blanca (ASA Tierra Blanca), la Sociedad Usuarios del Agua La Maya/La Esperanza (SUAME), el Servicio Nacional de Riego y Avenamiento (SENARA) y el Instituto Mixto de Ayuda Social ( IMAS ) deciden iniciar un proceso de cambio de ideas y conductas sobre el manejo del agua de escorrentía y de suelos que se materializó en la ejecución del proyecto Conservación de Suelos en la Microcuenca Páez-Tatiscú, llevando acciones como (Solano, 2002):

- Desarrollo de drenajes que aislen la escorrentía en la cuenca media y drenaje secundario dentro del área de proyecto, con el propósito de quebrar la fuerza del agua que provoca arrastre del suelo.
- Planificación de fincas según capacidad de uso del suelo.
- Establecimiento de muros de retención de suelos y cercas vivas.
- Mejoramiento en el manejo de los suelos introduciendo el codal, el arado de cincel y rastra rotativa.

Las cuales fueron concretadas en:

- Dos canales de guardia; uno desagua en río Tatiscú y otro en río Páez.
- Drenaje de 42 ha en 32 fincas del sector La Esperanza.
- 22 obras de disipación de energía.

- 5 obras de desagüe en río Páez
- Una obra de desagüe en río Tatiscú.
- Construcción de puentes de ingreso a las fincas del sector La Esperanza, con capacidad de conducción adecuada al caudal de escorrentía.

Logrando según lo indican en el I Congreso Agrícola Conservacionista llevado en el 2009, un amortiguamiento de las fuerzas de la escorrentía, disminución del arrastre y evitando las inundaciones frecuentes provocadas por la lluvia intensa y la labranza inadecuada. Aunado a este proyecto se hayan otros, como el de la protección y reforestación de nacientes de la zona norte, en Oreamuno de Cartago, en el cual se entregaron a 6 ASADAS materiales y árboles, para cubrir 10 nacientes en el área, entre ellas: San Juan de Chicua 1 y 2 en Cot, Los Quemados y Pozo Amarillo en Potrero Cerrado y otras ubicadas en Cipreses, Paso Ancho, Llano Grande y San Pablo de Oreamuno (Fallas, 2010). Más recientemente el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS-UCR) realizó una consultoría para el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) en las faldas del volcán Irazú (ProDUS 2016), la cual tiene como primer eje mejorar la calidad de vida de los pobladores del cantón que se ven afectados por los problemas de inundaciones y la generación de una estrategia de trabajo que permita controlar los problemas de erosión y escorrentía que afecta la zona. Por segundo eje tiene la planificación de una estrategia de abordaje del problema de erosión y pérdida de suelo, para finalmente mejorar la relación del ser humano con su entorno.

Respecto a la temática de IV, recientemente, en el país se han realizado diversas acciones vinculantes a la IV, aunque bajo conceptos diferentes. El análisis realizado por Rodríguez (2010) recopila muchas de las acciones sobresalientes realizadas en el país, específicamente aquellas relacionadas con la mejora del ambiente urbano:

- El Plan de Mejoramiento Ambiental de la Cuenca del Río Virilla (PLAMA-VIRILLA), promovido desde 1993 por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), con importantes proyectos de reforestación en esta cuenca urbana.
- Iniciativa “A que sembrás un árbol”, con los esfuerzos del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAE) y la CNFL, con el objeto de promover la participación ciudadana en la recuperación de la cobertura boscosa nacional.

- Proyecto de Planificación Regional y Urbana del Valle Central de Costa Rica (PRUGAM), que pretende crear una trama verde que conecte las zonas protegidas de la GAM y los parques metropolitanos mediante corredores fluviales.
- Finca modelo de buenas prácticas ambientales en ciudades, llamada Floresta Urbana, como parte de los esfuerzos de la unión del CNFL, PRUGAM y el Ministerio de Vivienda. La cual presenta ser una iniciativa con mucho potencial para la implementación de las I.V., como tal, en el país.
- Proyecto San José Posible, proyecto en el cual se pusieron en práctica alternativas experimentadas en la Finca Floresta Urbana.
- Plan de Arborización Urbana (PLANARBU), el cual promueve y gestiona iniciativas de arborización en los distritos capitalinos en conjunción con la empresa privada. Incluidas parte de las señaladas anteriormente y otras varias como el proyecto “San José Limpio y Verde”, cuyo objetivo fue retomar el valor escénico y ambiental de la ciudad, mediante la plantación de diferentes especies arbóreas. Y el proyecto “Repoblación del Bosque Urbano”, que surge por la necesidad de material vegetal idóneo para la arborización urbana.
- Esfuerzos para el embellecimiento de las principales vías de la GAM (principalmente), por parte de la Asociación de Seguridad y Embellecimiento de Carreteras Nacionales (ASECAN) en asociación con Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT).
- Esfuerzos de municipios para la implementación del elemento forestal en sus planes, como lo son el de Santa Ana (en cooperación con la Asociación de Paisajistas Costarricenses, ASOPAICO) y el municipio de Belén.
- Reforestación del Parque La Sabana, mediante esfuerzos del Instituto de Biodiversidad (INBiO) y el Banco Scotiabank. En esta línea se presenta el estudio de Conejero et al., (2011) que además de analizar el proceso de rearborización del Parque La Sabana, evalúa de manera general el ecosistema urbano de San José, dando énfasis en las zonas verdes presentes, en las relaciones con los ecosistemas naturales circundantes y como mejorar su capacidad ecológica.

También existen diversos estudios que se han realizado en la temática del ambiente natural en las ciudades costarricenses, principalmente las del casco central del país, por ejemplo, la revista *Ambientico* lanzó en abril del 2013 una edición exclusiva para la temática del componente verde en las ciudades costarricenses, bajo el titular “Biodiversidad en las Ciudades Costarricenses”

(Ambientico 2013). Todos estos artículos aportan al conocimiento sobre la trama verde en las ciudades, desde una contextualización general de oportunidades y necesidades para abordar temas de IV, hasta estudios más específicos de inventarios de arbolado urbano, áreas verdes, corredores y propuestas de especies para el uso en proyectos de arborización urbana. También orientado en acciones vinculadas con las IV, pero para ambientes más periurbanos y rurales, el Gobierno de Costa Rica inició en 2013 un diálogo con el Banco Mundial sobre la posibilidad de colaborar en la preparación de una visión y estrategia de Crecimiento Verde e Inclusivo (CVI) para los paisajes rurales productivos del país, que permitan la diversificación de la productividad en el espacio rural, así como disminuir la vulnerabilidad económica y ambiental (Vignola, Otarola, Majano, & Kilian, 2014). Ante ello un estudio realizado por Vignola et al., (2014), tiene como objetivo el diseño y aplicación de una metodología para el análisis conjunto de los diferentes elementos del CVI a nivel territorial, que sirva como insumo para un diálogo que permita llegar a acuerdos sobre prioridades de política y de acciones que promuevan actividades productivas enfocadas a una economía baja en emisiones y resilientes al CC.

A pesar de que estos esfuerzos han contribuido en la trama verde de las ciudades, todavía es evidente que queda mucho por hacer, para lograr un sistema realmente integrado y planificado de áreas verdes en las ciudades de la GAM y periféricas. Donde el tema forestal urbano todavía es un comodín en las agendas de los gobiernos locales (Rodríguez, 2010). En este sentido, en el año 2005 se constituyó la Comisión Interinstitucional de Foresta Urbana, la cual realizó un primer congreso de Arborización Urbana ese mismo año y concluyó que en Costa Rica falta gestión y adecuado conocimiento técnico del elemento forestal, su potencial estético y económico respecto al turismo, a pesar de contar con academias que imparten carreras y generan profesionales ligadas directamente a la temática (Ing. Forestales, biólogos, ciencias sociales, arquitectura, otras; Rodríguez, 2010). Sin embargo, en general, se visualiza un panorama positivo, donde funcionarios públicos y empresa privada ven con buenos ojos el trabajo conjunto hacia la regeneración de las cuencas urbanas, pero para que esto suceda es necesario un enfoque científico, para decidir acciones de manejo que aproximen el máximo aprovechamiento de los beneficios de las IV (Rodríguez, 2010).

## **V. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Determinar las zonas de infraestructura verde, para la reducción del volumen de escorrentía y mitigación de la vulnerabilidad a inundaciones en la subcuenca del río Páez, Cartago.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar las propiedades morfométricas y biofísicas, para la caracterización de la subcuenca.
2. Determinar las zonas con un mayor grado de vulnerabilidad a crecidas e inundaciones dentro de la subcuenca del río Páez a partir de las características morfométricas y grado de conflictividad en las Áreas de Protección, para la reducción del volumen de escorrentía de aguas pluviales mediante infraestructura verde.
3. Zonificar las áreas verdes y arbolado urbano existentes en las principales comunidades dentro de la subcuenca, para la ubicación de áreas potenciales de infraestructura verde.

## **VI. HIPÓTESIS**

Las infraestructuras verdes permiten reducir la vulnerabilidad a inundaciones a través de la gestión eficaz de las escorrentías.

## VII. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la subcuenca del río Páez, ubicada en la zona central de la hoja cartográfica nacional Istarú (1:50 000), desde las faldas del volcán Irazú, atravesando la comunidad de Cot y Paraíso de Cartago, hasta llegar al Valle de Ujarrás, desembocando sus aguas a la cuenca alta del Río Reventazón. Entre las coordenadas planas 515 682 y 519 780 m este y 1 102 192 y 1 087 436 m norte del sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM). Abarcando un área de 28,34 km<sup>2</sup>, dedicada principalmente a la agricultura de hortalizas y pastizales (Tencio 2013; Ledezma, 2009a).

Esta cuenca abarca territorios administrativos tanto del cantón de Oreamuno como de Paraíso de Cartago (Figura 1). El primero cubre las tierras altas de la cuenca, a las faldas del Volcán Irazú, su actividad económica es básicamente agrícola, con la siembra y comercialización de hortalizas: papas, cebollas, zanahorias y lechugas, entre otras (Tencio 2013 y Ledezma 2009a). El segundo cubre las tierras más bajas de la cuenca, en general, los terrenos del sector sur de este cantón se da la producción cafetalera y el aprovechamiento de los abundantes recursos hídricos de la zona; en el sector norte, con la incorporación de los proyectos de parcelación desarrollados por el Instituto de Desarrollo Agrícola se da un crecimiento en el aprovechamiento de estas tierras para agricultura tradicional de legumbres y hortalizas (Ledezma 2009b).

Geológicamente la región de la cuenca presenta en la parte más alta (al norte) antiguas coladas de lava andesítica augítica, de color negro a gris claro, autobrecha vesicular, de grano muy fino, localmente con capa superficial que parece roca fragmentada, roja y escoriácea. (Krushensky, 1972). Siguiendo hacia las partes media-alta, media y media-baja de la cuenca se presenta una geología compuesta de Miembro Superior, con antiguas coladas de lava andesíticas augítica, de color gris intermedio y de grano fino, localmente vesiculares, con lahares abundantes, de ligera a profundamente meteorizados, y algunas camas de ceniza (Krushensky, 1972). Por último, en la parte baja de la cuenca se caracteriza por un miembro de cama de ceniza, de color roja y profundamente meteorizada de grano fino (Krushensky, 1972).

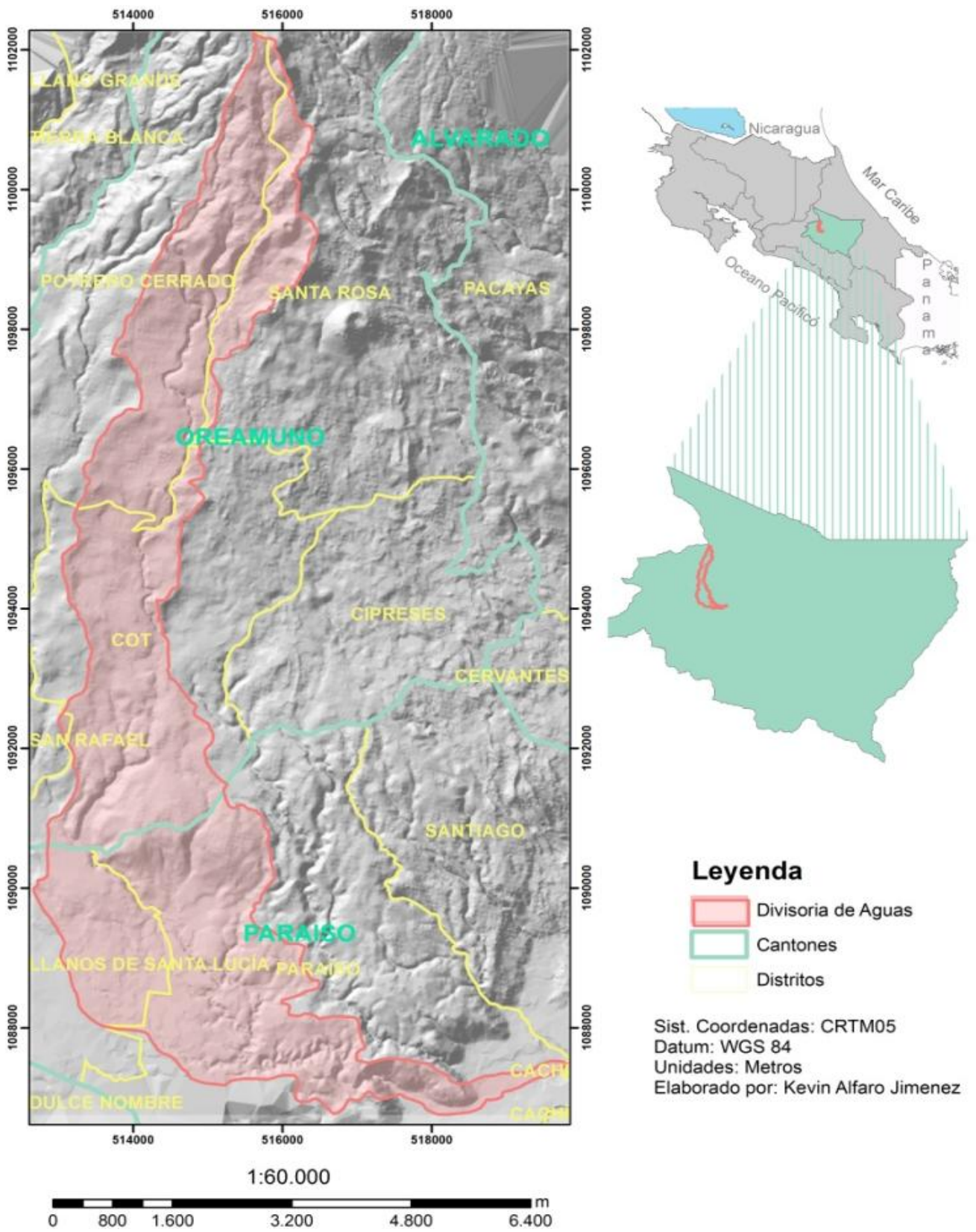
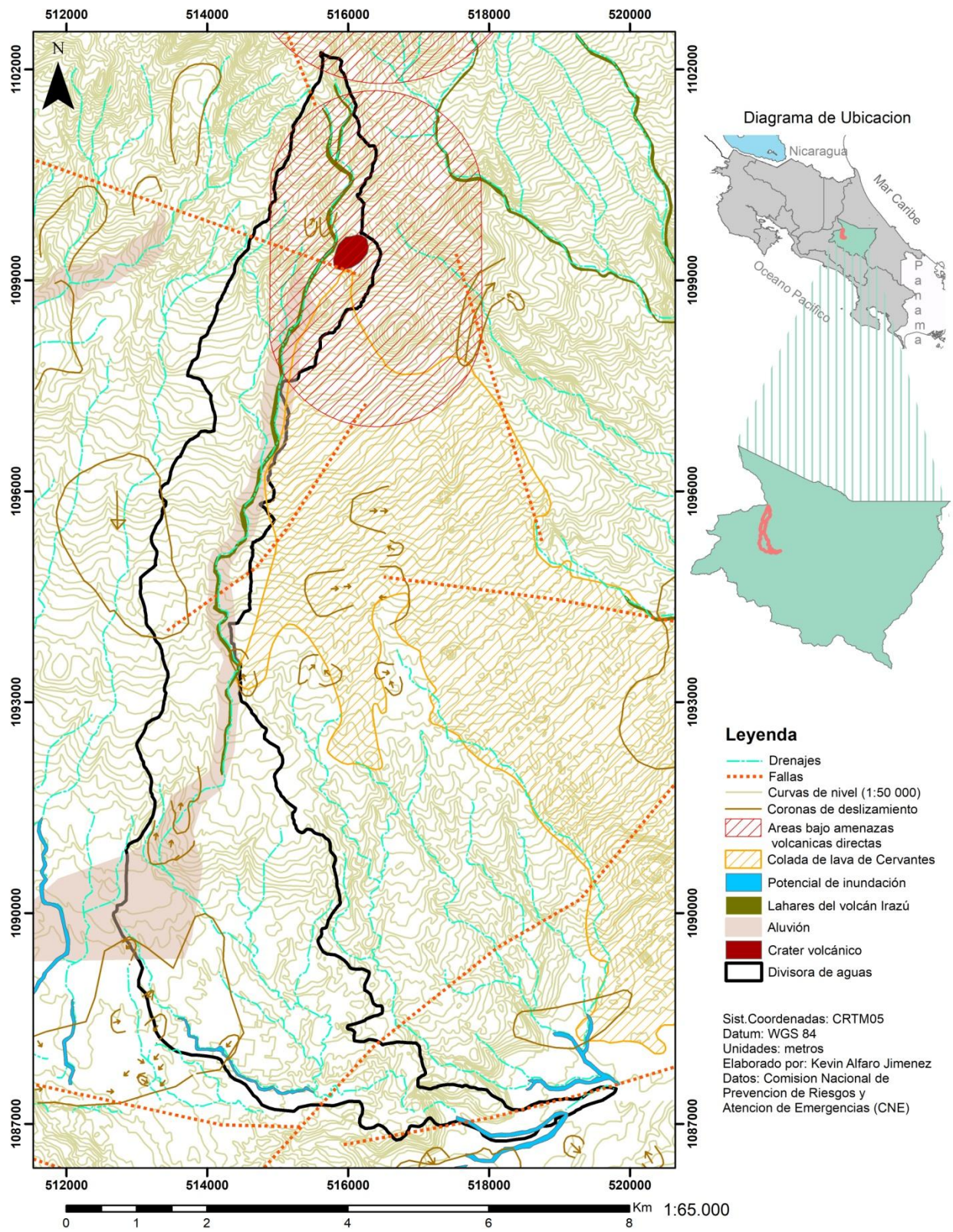


Figura 1. Ubicación geográfica y administrativa de la subcuenca del Río Páez

La zona de estudio presentan una serie de áreas con amenaza de deslizamientos, principalmente en la zona media y parte de la zona baja de la cuenca (Rojas, 2011), áreas bajo las amenazas volcánicas directas, que ante una eventual erupción pueden verse sometidas a actividad exhalativa predominante de gases, caída de material volcánico (piroclásticos), potencial generación de lluvia acida, caída de cenizas que asociado con lluvias intensas pueden contribuir a la formación de flujos de lodo de alta peligrosidad debido a la alta pendiente y densidad de drenaje (Figura 2; CNE, 2017). Además de cauces con potencial a sufrir flujos de lodo, cabezas de agua, inundaciones repentinas asociadas a lluvias intensas o fenómenos hidrometeorológicos combinados (representada en la figura 2 por las áreas con incidencia de lahares y aluviones) (CNE, 2017; Vallejos, Esquivel, & Hidalgo 2012; PREVDA, Nacional, & Europea, 2008). Al respecto, Sergio Sánchez Castillo experto del CNE (comunicado oral, 2017) señala que las zonas aledañas a la quebrada Pollo y cauce posterior a la catarata Los Novios han presentado una mayor incidencia a inundaciones (Sjobohm, 2008).



**Figura 2.** Amenazas presentes en la subcuenca del río Páez y zonas aledañas

## VIII. MARCO TEÓRICO

### 1. Vulnerabilidad

La Estrategia Internacional para la Reducción de Riesgos a Desastres (EIRD) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), define vulnerabilidad como “las características y las circunstancias de una comunidad, sistema, o bien, que los hacen a estos susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza” (ONU 2009, p. 34). Luego, desde el punto de vista de cambio climático (CC) el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha definido el concepto como “la medida en que un sistema es susceptible a, o incapaz de afrontar efectos adversos del CC, incluidos la variabilidad y los extremos climáticos” (Locatelli et al., 2009, p. 56). El marco legal costarricense define el concepto, bajo la Ley N° 8488 (2005), como “condición intrínseca de ser impactado por un suceso a causa de un conjunto de condiciones y procesos físicos, sociales, económicos y ambientales”.

La vulnerabilidad puede determinarse por el grado de exposición y fragilidad de los elementos susceptibles y la limitación de su capacidad para recuperarse (CNE, 2014). El IPCC define tres componentes principales que componen la vulnerabilidad: a) la exposición, índole y medida en las que un sistema está expuesto a variaciones climáticas considerables, b) la sensibilidad, medida en que un sistema es afectado, ya sea adversa o favorablemente por estímulos relacionados con el clima, y c) la capacidad de adaptación, que es la capacidad de un sistema para ajustarse al CC (Locatelli et al., 2009). La vulnerabilidad se caracteriza por ser: a) multidimensional y diferencial, varía a lo largo del espacio geográfico y dentro de los grupos sociales, b) dependiente de la escala de medición, es decir, tiempo, espacio y unidad de análisis sea esta individual, comunitaria, municipal o regional, y c) dinámica, debido a sus características y a las fuerzas genéricas de su variación a lo largo del tiempo (Volgel y O’Brien, 2004), estas características dificultan su cálculo o estimación. En Costa Rica los factores más comunes que constituyen y aumentan la vulnerabilidad son (CNE, 2012 y 2014):

- La construcción de asentamientos marginales en zonas de alta pendiente o riberas de ríos.
- La alta densidad demográfica de las ciudades.
- Pérdida de capacidad (mantenimiento) de la infraestructura urbana.
- Los cambios en el uso del suelo sin la debida planificación.

- La construcción de obras sin seguir los lineamientos de diseño adecuados y las prácticas ambientales inapropiadas.
- Carencia de procesos de concienciación local y negación del riesgo en áreas de alta susceptibilidad y exposición a las amenazas.
- Déficit de medidas de preparación para enfrentar situaciones de riesgo.
- Inadecuada gestión ambiental (incorrecta administración de cuencas hidrográficas), entre otros.

## **2. Contextualización de la Vulnerabilidad a Inundaciones**

Las inundaciones han aumentado su severidad debido al acelerado cambio de uso de la tierra e incremento de la presión demográfica (PREVDA et al., 2008), que alteran la hidrología natural de la cuenca al reducir la infiltración del agua y modificar los patrones de escorrentía (Kauffman & Brant, 2000), ubicando esta amenaza natural como la más frecuente a nivel mundial (Abhas, Bloch & Lamond, 2012). Algunas cifras a nivel mundial señalan que tan solo en el 2010 cerca de 178 millones de personas fueron afectadas por inundaciones y más de 40 mil millones de dólares en pérdidas en el período 1998-2010 (Abhas, Bloch & Lamond, 2012), a nivel nacional el Vigésimo Primer Informe del Estado de la Nación publicado en el 2015 recalca la alta vulnerabilidad a fenómenos hidrometeorológicos en las zonas altamente urbanizadas, reflejándose en 3 829 incidentes en el Valle Central en el periodo 1985-2013 (PEN, 2015). Estos fenómenos generan pérdidas a nivel de infraestructura y en general al nivel económico global del país, al disminuir la competitividad del mismo respecto al atractivo a invertir y a las pérdidas en las actividades económicas que resultan afectadas (Retana, 2012), por ejemplo, durante el período 2005-2009 en promedio las pérdidas representaron un 0,78% del PIB, cifra que representó el 18,34% del gasto de capital (Alfaro, 2011), ubicándose la mayor parte de estas pérdidas en las zonas urbanas, debido a la mayor concentración de pobladores y activos, dificultando su manejo (Abhas, Bloch & Lamond, 2012).

Los principales detonantes del aumentado de la vulnerabilidad a las inundaciones son: a) la expansión urbana desorganizada en compañía de un inadecuado cambio de uso de a tierra, y b) el CC, donde las alteraciones en los patrones meteorológicos asociados a un clima más cálido tienen el potencial de causar más inundaciones (Abhas, Bloch & Lamond, 2012; Secretaría de Ambiente y

Desarrollo Sustentable, 2015). El uso de la tierra en actividades agrícolas, ganaderas y el creciente urbanismo son las perturbaciones antrópicas más importantes de los ecosistema terrestres (Morera et al., 2007; Sanchun et al., 2016), alterando más de un tercio de estos ecosistemas y modificando la estructura y el funcionamiento de los mismos, desequilibrando la capacidad reguladora y estabilizadora del medio ambiente (Sanchun et al., 2016). Un estudio realizado por Schueler (1995) señala que a partir de un 10% a 20% de impermeabilidad de un área geográfica determinada, se inicia una fuerte relación negativa entre la integridad biótica, entendiéndose como la capacidad de mantener una comunidad adaptada, integrada y balanceada, con una composición, diversidad y organización funcional comparable con el hábitat natural de la región (Karr, 1981); las condiciones de ribera, refiriéndose a la morfología y estructura; el aumento de la utilización del suelo; provocando un aumento desde un 40% hasta un 83% de las pérdidas de las entradas de lluvias en escorrentía superficial, caso contrario sucede con los paisajes forestales que con precipitaciones similares pierden alrededor del 13% (Bonan 2002). Estas alteraciones en la permeabilidad del paisaje han modificado la hidrología natural del mismo, al impedir la infiltración del agua en el suelo, favoreciendo la concentración del flujo de agua de lluvia sobre el paisaje, alterando los patrones de escorrentía y drenaje (Pouyat et al., 2007; Bonan, 2002; Kauffman & Brant 2000), afectando los ecosistemas y ciclos biogeoquímicos (Walsh et al., 2005b) y finalmente una exposición cada vez mayor de la población a riesgos ambientales (Molina, 2007).

Las inundaciones, están asociadas a las características del régimen pluviométrico y térmico que registre el clima imperante (Ferrando 2006), a las características morfométricas (Strahler, 1964; Karalis et al., 2014), al desarrollo del sistema de drenaje (Kumar-Rai, Narayan-Mishra, & Mohan, 2017) y a la capacidad de retención hídrica de la cuenca (Ahmad, Ahmad y Rashid, 2012; Zavoianu, 1985); aspectos influyentes en la torrencialidad, la velocidad de respuesta, tiempo de concentración, y volumen de los caudales (Ferrando, 2006). En el contexto de vulnerabilidad a inundaciones se debe tener claro que los efectos de las inundaciones no se pueden eliminar totalmente, sino, más bien, se trata de mitigar o reducir tales efectos (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015). Existen dos categorías de medidas para mitigar el efecto de las inundaciones, a) las estructurales que tienen por objeto controlar el flujo del agua, para evitar o minimizar los efectos de las inundaciones, y b) las no estructurales que apuntan medidas de planificación y gestión del desarrollo urbano (CNE, 2012, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015).

La planificación del uso de la tierra y la regulación del crecimiento urbano son aspectos claves en la gestión integrada del riesgo a inundaciones (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015). El ordenamiento territorial es una herramienta importante en la prevención y mitigación de desastres naturales, la cual sugiere la interacción de los asentamientos humanos hacia la adaptación más que a la dominancia impositiva de la naturaleza, a partir del conocimiento de las potencialidades y restricciones del territorio (Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015; CNE, 2014 y 2012). En Costa Rica los Planes Reguladores son los principales instrumentos de ordenamiento territorial (CNE, 2014 y 2012), sin embargo los municipios del país enfrentan una carencia económica, técnica y administrativa que le dificulta la creación y/o aplicación de un plan regulador (CNE, 2012), aunque existen otras normas e instrumentos que a nivel país permiten a los municipios realizar cierta gestión del riesgo (véase más en CNE, 2012).

### **3. El paisaje y la cuenca hidrográfica como unidad de manejo del paisaje**

Desde el siglo XIX, se ha desarrollado el concepto de paisaje en las escuelas de geografía de Alemania (Morera et al., 2007), iniciando con una conceptualización limitada a la morfología del espacio geográfico (mosaico de elementos diversos en forma, distribución, número y superficie, Morera et al., 2007). Las contribuciones y uso del término en investigaciones posteriores han dirigido hacia un concepto poliédrico, como el que interpretan Forman y Godron (1986), zona heterogénea compuesta por la interacción de los ecosistemas y elementos que se repiten de una manera similar y que se hallan a su vez anidados dentro de áreas más grandes que a menudo limitan o son controlados por los procesos ecológicos (Ahern, 2007), que al interactuar lo hacen heterogéneo y con características específicas que lo diferencian de otros espacios en un momento dado (dinámica espacio-temporal del mosaico paisajístico, Giordano, 2004), ampliando una gama de posibilidades de valoración cuantitativa, para el análisis de la realidad y dinamismo de un paisaje y su incidencia ecológica (Ramírez, 2016).

El enfoque multiescala considera que un paisaje está anidado dentro de otras zonas más extensas, basándose en la teoría de la jerarquía que aborda la estructura y comportamiento de los sistemas funcionales simultáneos a diversas escalas (Ramírez, 2016). Una unidad del paisaje que permite el

uso de este enfoque es la cuenca hidrográfica (cuenca, subcuenca y microcuenca), que es la unidad de manejo del recurso hídrico e incluso es considerada como la unidad natural de manejo de los recursos naturales, así como, para la planificación en la mitigación de la vulnerabilidad a desastres naturales (Benegas et al., 2014), en especial los relacionados con aguas superficiales, gracias a su independencia hídrica con respecto a los territorios vecinos al no recibir (en régimen natural) transferencias superficiales (Reyes, 2003).

Las cuencas hidrográficas son sistemas naturales o periurbanos, en el cual ocurren los procesos hidrológicos y geomorfológicos del paisaje (Dar et al., 2013; Strahler, 1964), corresponde al área que está definida por la dirección de sus cursos de agua, a partir de los cuales las precipitaciones son drenadas hacia un cauce principal, y está delimitada por el parteaguas (Cruz-Romero et al., 2015; Abrahams, 1984), funcionando como un recolector y almacenador de aguas pluviales que son convertidas en escurrimiento y evacuadas en una salida común (Agarwal, 1998; Cruz-Romero et al., 2015). Esta unidad de análisis espacial es ampliamente considerada para abordar estudios de distintas naturalezas, entre ellos los relacionados con planificación, ordenamiento territorial (Ayala, Páez & Araque, 2007), conservación de ecosistemas y agua, así como del desarrollo agroindustrial, económico y social (Trejos, 2011), ubicándola como la única unidad del paisaje que desde el punto de vista metodológico garantiza un análisis holístico de las variables perceptibles del territorio (Hernández, 2013).

La ecología del paisaje surge para comprender la influencia de los procesos ecológicos en temáticas ambientales (Morera et al., 2007; Ramírez, 2016; Romero & Vásquez, 2005), concepto que actualmente se considera un enfoque teórico-operativo que comprende las interrelaciones de los diferentes elementos del paisaje, estudiando su estructura, función y dinámica (Ramírez, 2016). Definiendo *estructura* como las relaciones espaciales entre los ecosistemas y los elementos del paisaje; *función* como las interacciones entre los elementos espaciales del paisaje; *dinámica* como los cambios en la estructura y función del mosaico paisajístico a través del tiempo (Forman & Godron, 1986). Los principales elementos del paisaje son: a) los *parches*, zonas no lineales relativamente homogénea que difiere de su entorno y proporcionan múltiples funciones; b) los *corredores*, zona lineal de un tipo de cobertura terrestre en particular que es diferente en contenido y estructura física de su contexto; c) y la *matriz*, se considerada como aquel tipo de cobertura terrestre

dominante en términos de superficie, grado de conectividad y continuidad, ejerciendo control sobre la dinámica del paisaje (Forman, 1995; Forman & Godron, 1986).

La composición y la configuración espacial de los elementos que componen el paisaje influyen directamente en el funcionamiento de los mismos (Turner, 1989). Desde la perspectiva de cuenca hidrográfica uno de los ecosistemas más importantes es la vegetación riparia, por soportar periodos de inundación y presentar gran flexibilidad ante los empujes generados por las crecidas, además sus procesos de crecimiento y muerte es (en muchos casos) compatible con la periodicidad de las crecidas y de los procesos de erosión y sedimentación (Apan et al., 2002), pese a la importancia de la vegetación riparia en el ciclo del agua, se presenta un fuerte impacto antrópico sobre estos ecosistemas (González, 1996), provocando la fragmentación del ecosistema, dejando pequeños fragmentos de bosque que dificultan la conectividad ecológica entre los ecosistemas y con ello la disminución en la capacidad de brindar servicios ecosistémicos (Tabacchi et al., 1990). Las áreas de protección de los ríos y quebradas (AP), que en Costa Rica están definidas en la ley forestal (Ley 7575) y son consideradas también como la matriz para la formación de conectividad (corredores) entre fragmentos de ecosistemas del paisaje.

El potencial de los espacios naturales para brindar servicios ecosistémicos deben ser analizados, considerando los principios de la ecología del paisaje (Ahern, 2007; Ramírez, 2016), en especial dentro del contexto urbano-rural sostenible (Ahern, 2007; Li, Wang, Paulussen y Liu, 2005; Ramírez, 2016; Lehman et al., 2014). La zona urbana puede ser descrita mediante un patrón de mosaicos de áreas verdes, que proporcione una imagen de la estructura y distribución de patrones del paisaje, del cual se puede inferir conclusiones de los servicios ecosistémicos de sitios específicos (Ramírez, 2016; Lehman et al., 2014). Diversos estudios han relacionado las formas, distribución y variedad de los patrones del paisaje con el potencial de brindar servicios ecosistémicos, entre ellos Lehman et al. (2014), Gill et al., (2007) y Brody et al., (2013). Woo y Park (2016) señalan en sus trabajos tres principales modelos que definen las condiciones generales de estos patrones del paisaje: a) el modelo de Matriz de Parches, que enfatiza en la diversidad del paisaje (Turner, 1989); b) el modelo de Red de Hábitats, que se centra en que se debe mantener la interacción entre los mosaicos del paisaje, a través de la conectividad de parches, haciendo referencia a los flujos de funciones, energía y materia (Ndubisi, 2002); y c) el modelo de Directrices Espaciales, que se argumenta en que los patrones espaciales deben presentarse: parches grandes, parches y corredores bien

conectados, corredores amplios y áreas naturales heterogéneas en zonas desarrolladas (Forman & Godron, 1986).

#### **4. Morfometría en el contexto de cuenca hidrográfica**

Los primeros fundamentos del estudio cuantitativo de la morfometría en las cuencas se dan a inicios del siglo XVII con los aportes de Guglielmini, Bernaoulli, Chezy, Manning, Brahams y en las ideas de Hatton (Romero y López, 1987), posteriormente se encuentran los estudios de Gravelious (1914), quien propuso una jerarquización de órdenes de corrientes, sin embargo, el auge de las investigaciones en este sentido se mostró hasta mediados del siglo XX en Estados Unidos, debido al interés por obtener fórmulas que predigan caudales máximos, atendiendo a que las propiedades morfométricas afectan la respuesta del caudal (González, 2004), reconociéndose principalmente los trabajos de Robert Emer Horton y posteriormente Arthur Newell Strahler, autores que añadieron nuevas medidas y propuestas de métodos para la descripción de las cuencas hidrográficas (Ajibade et al., 2010).

El análisis morfométrico es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca, por lo tanto, es la medida y análisis matemático de la configuración de la superficie terrestre, la forma y la dimensión de sus formas terrestres (Kumar-Rai et al., 2017), ocupándose del estudio cuantitativo del área, la altitud, el volumen, la pendiente, los perfiles de la tierra y otras características de la cuenca (Strahler 1964), como la morfometría de las red de drenajes, que son un sistema que reacciona a la información de cada uno de los parámetros morfométricos de la cuenca (Karalis et al., 2014) y constituyen un sistema de transferencia de energía y materia en la unidad cuenca hidrográfica (Romero y López, 1987).

El conocimiento cuantitativo de las características, puntuales, lineales, areales y volumétricos del relieve resultan imperativas, para el análisis morfométrico (Méndez, 2016). En el contexto de la cuenca hidrográfica es reconocido este tipo de análisis para comprender el desarrollo topográfico de la cuenca, formas de la tierra, características del suelo, comportamiento de la escorrentía en el paisaje, potencial del agua superficial, aguas subterráneas, entre otros ( Kumar-Rai, Narayan-Mishra, & Mohan, 2017; Cruz-Romero et al., 2015; Ajibade, Ifabiyi, Iroye, & Ogunteru, 2010). Los rasgos morfométricos condicionan en gran medida los procesos hidráulicos e hidrológicos de las

aguas de escorrentía de la cuenca (Méndez 2016; Ajibade et al., 2010), además reflejan varios procesos geológicos y geomorfológicos (Kumar-Rai, Mohan, Mishra, Ahmad, & Narayan-Mishra, 2017), por ende, existe una relación forma/proceso que permite, mediante el análisis morfométrico, correlacionar características fisiográficas de una cuenca con fenómenos hidrológicos (Kumar-Rai et al., 2017), para comprender las condiciones de respuesta hidrológica, probabilidades de remoción en masa, control de la infiltración y la distribución del agua de lluvia en el paisaje (Ajibade et al., 2010).

#### **4.1. Parámetros morfométricos en relación con la escorrentía e inundaciones**

El análisis morfométrico proporciona un medio para describir las características hidrológicas de la cuenca (Strahler, 1964), de esta premisa surgió el cuestionamiento de la aplicación de principios geomorfológicos para comprender y cuantificar los riesgos ambientales, lo que llevó a una cantidad significativa de investigación a enfocarse en identificar las relaciones entre la morfometría de la cuenca y los procesos tales como escorrentía, crecidas e inundaciones (Patton, 1988; Karalis et al., 2014). Algunas de ellas han establecido relaciones entre los parámetros morfométricos y el potencial de inundación (Karalis et al., 2014) y han estimado la escorrentía superficial y la intensidad de flujo del sistema de drenaje, asociando las características geomorfológicas con los parámetros morfométricos (Kumar-Rai, Narayan-Mishra, & Mohan, 2017), relaciones que son significativas para la predicción de inundaciones en cuencas, principalmente en aquellas no maduras (Karalis et al., 2014).

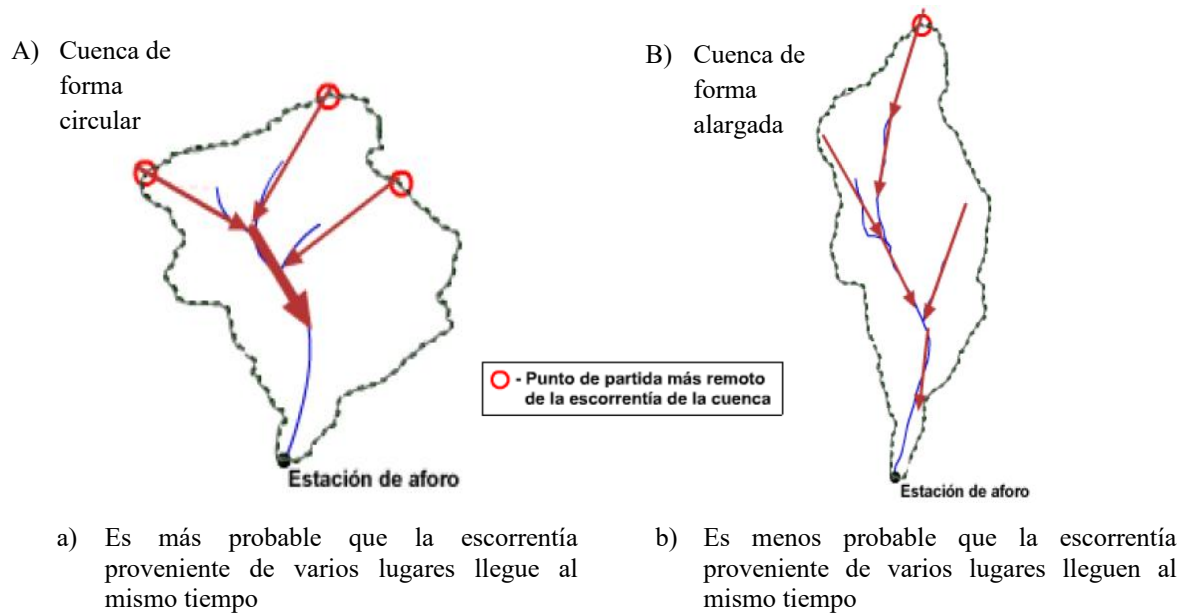
El efecto de la escorrentía sobre las crecidas adquiere mayor importancia cuando se trabajan con cuencas de pequeñas dimensiones y mayor aún, si estas se hallan en ambientes montañosos y bajo regímenes torrenciales (Méndez, 2016; Ayala, Páez & Araque, 2007), debido a que cuencas pequeñas poseen mayor fragilidad, vulnerabilidad y sensibilidad ante precipitaciones intensas de corta o prolongada duración. Esto se debe a un menor efecto de almacenamiento de valle que poseen las cuencas pequeñas en comparación con cuencas grandes (Ayala, Páez y Araque, 2007) y debido a que el flujo de corriente y flujo terrestre dependen de la distancia recorrida por el agua en el canal, por consiguiente, del tamaño de la cuenca, así como de la pendiente y el estado de los canales (Zavoianu, 1985).

Las inundaciones se pueden identificar por factores asociados con la propia captación, red de drenaje y otra serie de factores. La topografía es el principal controlador de la respuesta hidrológica de una cuenca a la precipitación, por lo tanto, es un importante determinante para la identificación de sitios vulnerables a inundaciones es la topografía (Ahmad, Ahmad y Rashid, 2012), la forma, el tamaño y la pendiente son propiedades morfométricas que modifican el comportamiento de la red hidrológica, actuando principalmente en el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento (González, 2004), análogamente las características morfológicas como el orden de las corrientes, la densidad de drenaje, la pendiente del canal, el relieve, la longitud del flujo terrestre, la frecuencia del arroyo y otros aspectos morfológicos de la cuenca hidrográfica son importantes para comprender la hidrología de la cuenca hidrográfica (Zavoianu, 1985). Para tener una mejor comprensión de los mecanismos de inundación es necesario añadir otras características naturales de la cuenca, como el uso de la tierra, la cobertura de la tierra y la geología, los cuales poseen una significativa influencia sobre el hidrograma de captación de una cuenca (Ahmad, Ahmad & Rashid, 2012). A continuación se agrupan los parámetros morfométricos en seis grupos, para comprender la relación de estos con los procesos de escorrentía, crecidas e inundaciones.

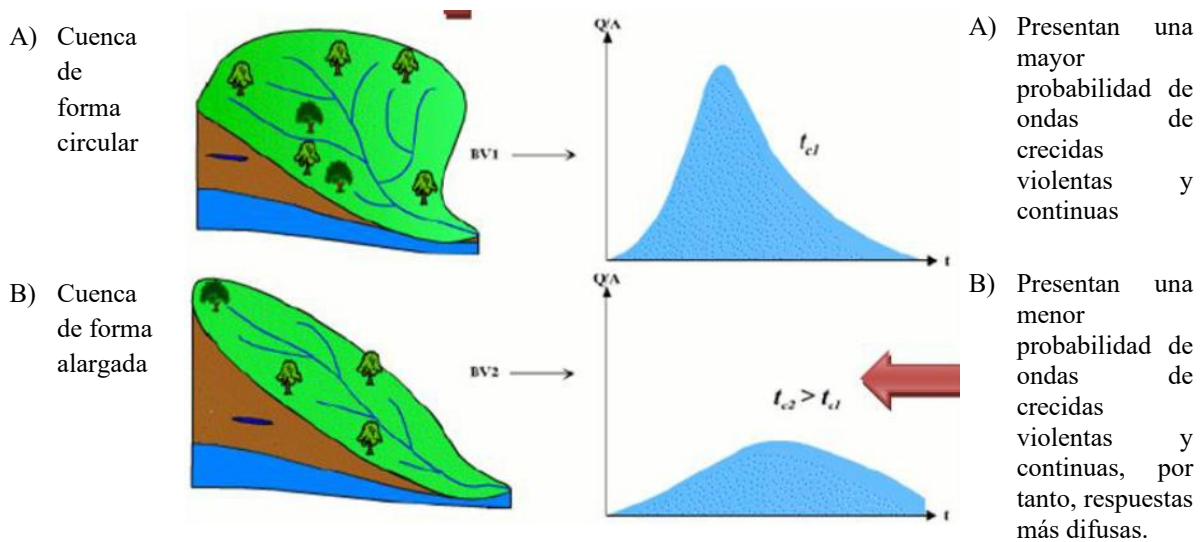
#### **4.1.1. Parámetros de Forma**

Se han definido diversos índices para determinar la forma de una cuenca (González, 2004), entre ellos los más utilizados son el índice de compacidad de Gravelius (1914), que compara la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo de igual superficie que la cuenca. La razón de elongación de Schumm (1956), que compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área. La relación de circularidad de Miller (1953), que compara el área de la cuenca con el área de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. El factor de forma de Horton (1945), que compara el área de la cuenca con la de un cuadrado de lados iguales al eje mayor de la cuenca. En general los parámetros de forma (compacidad, elongación, circularidad y factor de forma), indican cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca hidrográfica, pudiendo determinar la tendencia que posee la cuenca a las crecidas (Gaspari et al., 2012; González, 2004). La premisa es que cuencas con formas circulares tendrán una vulnerabilidad mayor a inundaciones, mientras que cuencas alargadas poseen menos posibilidad a ondas de crecidas continuas, debido a que la escorrentía que drena todos los límites de una cuenca circular tiene distancias similares de trayecto desde todos los extremos, llegando al cauce principal en

tiempos similares, lo que provoca una mayor posibilidad de ondas de crecidas continuas, mientras que en cuencas de forma alargada tienden a una respuesta más difusa, debido a que la escorrentía superficial posee trayectos variables en sus cuadrantes con respecto a uno central (Figura 3 y Figura 4; González, 2004; Gaspari et al., 2012; Fuentes, 2004; Snehla, 2013).



**Figura 3.** Efecto de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento  
Modificado de Sánchez (2010).



**Figura 4.** Forma esperada del hidrograma a la salida de una cuenca de acuerdo a los parámetros de forma

Modificado por Sánchez (2010)

#### 4.1.2. Parámetros de Drenaje

Los parámetros de drenaje indican la estructura de la red de drenaje y con ello la respuesta de la cuenca a evacuar la escorrentía. El parámetro orden, hace referencia al grado de estructura de la red (Fuentes 2004) e indica en general que a mayor orden, mayor será la red y su estructura más definida, es decir, una presencia mayor de controles estructurales del relieve y mayor posibilidad de erosión, o bien, que la cuenca podría ser más antigua (en determinados tipos de relieve; Fuentes, 2004, Gaspari et al., 2012).

La densidad de drenaje ( $D_d$ ) genera un mejor conocimiento de la red de drenajes de la cuenca (Fuentes 2004), en general, valores altos de " $D_d$ " han sido comúnmente relacionado con materiales impermeables a nivel subsuperficial, vegetación dispersa y relieves montañosos (Strahler, 1964), lo que indica una mayor estructuración de la red fluvial, o bien, que existe mayor potencial de erosión (Fuentes 2004, Srinivasa-Vittala, Govindaiah & Honne-Gowda 2004); en consecuencia y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca cuanto mayor sea " $D_d$ " más rápida será la respuesta de la misma frente a precipitaciones, evacuando el agua en menor tiempo. La " $D_d$ " afecta el tipo de escorrentía, así como el trayecto en ladera y velocidad de la escorrentía, la premisa es que en zonas de alta " $D_d$ " la escorrentía recorre la superficie rápidamente, rebajando el tiempo de concentración e incrementando los picos de crecida, al haber menor infiltración (Gaspari et al., 2012; González, 2004 y Shehal et al., 2013). El parámetro de frecuencia de corriente ( $F_c$ ) apunta en este mismo sentido, estando relacionada con la permeabilidad, capacidad de infiltración y relieve de la cuenca (Ahmad et al., 2012)

La relación de bifurcación ( $R_b$ ) refleja el estado estructural y del patrón de drenaje (Strahler, 1964), las cuencas con " $R_b$ " bajos se caracterizan por presentar menores alteraciones estructurales (Strahler 1964) y el patrón de drenaje igualmente menos alterado (Nag 1998; Pareta y Pareta, 2011). Según González (2004) otros autores han relacionado este parámetro en combinación con otros parámetros como la compacidad de la cuenca, para determinar la respuesta a las crecidas, sin embargo, los resultados no son del todo claros. Raskesh et al., (2000) determinó que valores altos de " $R_b$ " indican picos de respuesta temprana en el hidrograma, con un potencial para inundaciones repentinas durante tormentas (Ahmad et al., 2012).

La textura de drenaje (Dt) es un parámetro que está en función de la litología subyacente, la capacidad de infiltración y el aspecto de relieve del terreno (Shumm, 1965). Valores altos infieren a una mala topografía del terreno (Shehal et al., 2013; Pareta & Pareta, 2011), en consecuencia un mayor escurrimiento superficial y erosión potencial (Strahler, 1964), atenuando una mayor posibilidad a crecidas repentinas.

#### **4.1.3. Pendiente**

La pendiente controla de forma directa la energía potencial y cinética de los flujos de agua del paisaje, e indirectamente los procesos de escorrentía, erosión y transporte (Sreedevi et al., 2009), dependiendo también de las condiciones climáticas y de la roca que constituye la cuenca, así como de la textura y movilidad de las capas superficiales de suelo, materia orgánica, etc. (Zavoianu, 1985). La pendiente presenta un rol importante en los procesos fluviales (Zavoianu, 1985), para abordar la relación entre la infiltración y la escorrentía, donde la relación entre pendiente e infiltración resulta inversamente proporcional, no así la escorrentía (Sreedevi et al., 2009); también para abordar la formación de las inundaciones, movimiento de escorrentía, el potencial energético de los cursos fluviales, el modelado y evolución de los canales fluviales, entre otros aspectos (Zavoianu, 1985). En general cuencas con pendientes mayores tienden a responder más rápido a las precipitaciones, disminuyendo la infiltración y escurriendo más rápidamente las aguas, incrementando la vulnerabilidad a crecidas más violentas (González, 2004).

#### **4.1.4. Tiempo de concentración**

Comúnmente este concepto ha sido definido desde la consideración del flujo terrestre, entendiéndose como tiempo requerido, con una lluvia uniforme, para que el cien por ciento de un tramo de tierra contribuya al escurrimiento directo en el caudal de salida (Fang et al., 2005; Gaspari et al., 2012), por lo tanto, a mayor tiempo menor posibilidad de crecidas, ya que el agua vendrá a desembocar de una manera difusa (Gaspari et al., 2012).

#### **4.1.5. Orientación**

La orientación corresponde al ángulo azimutal de la perpendicular al terreno, tomando valores entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , en el sentido de las agujas del reloj (Olaya, 2004), donde  $0^\circ$  y  $360^\circ$  corresponde a una orientación Norte,  $90^\circ$  para la orientación Este,  $180^\circ$  para una orientación Sur, y  $270^\circ$  una orientación Oeste. La orientación es la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máximo en un valor desde cada celda hacia sus vecinas, las áreas planas que no poseen pendiente, es decir, no poseen dirección de pendiente se le asigna un valor de -1 (Olaya, 2004) y corresponden a áreas propensas a la acumulación de escorrentía.

#### **4.1.6. Curvatura**

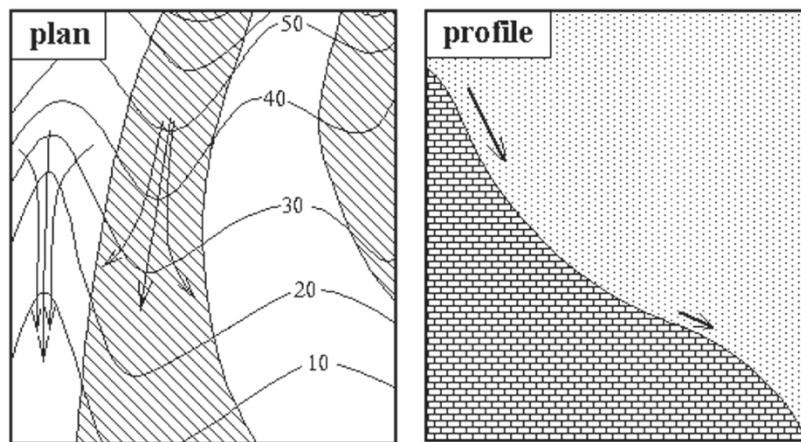
La curvatura es la propiedad bidimensional de una curva y describe cómo se curva una línea en un punto particular, cuantifica la magnitud que se desvía una curva respecto de una línea recta en este punto (Olaya, 2004), determinándose como la tasa de cambio de dirección de una curva (Roberts, 2001), lo cual se ha expresado a través de la segunda derivada de la altitud (Shary et al., 2005). Existen cerca de 10 curvas estudiadas, pero con menos aplicabilidad directa, siendo la curvatura vertical y horizontal las dos más ampliamente estudiadas (Olaya, 2004; Shary et al., 2005).

La curvatura vertical es la presente en un plano dispuesto perpendicularmente a la curva de nivel, de tal modo que la intersección de este con la superficie da la línea de máxima pendiente (Olaya, 2004). Esta curvatura guarda una relación directa con el flujo del agua que discurre en la dirección de dicha línea de máxima pendiente (Krcho, 1973), así, en las zonas donde el valor de la curvatura sea positivo (curva convexa), es decir, cuando la pendiente aumente, el flujo de agua tenderá a acelerarse en ese punto, por el contrario, si esta curvatura es negativa (curva cóncava) el agua tenderá a desacelerar y acumularse (Figura 5, Olaya, 2004).

La curva horizontal es la presente en sentido a las curvas de nivel, puede relacionarse también en su sentido aplicado con el flujo de agua que circula a través de la celda, aunque de un modo distinto y altamente complementario a la curvatura vertical (Olaya, 2004). La curva horizontal brinda información sobre la sección transversal del cauce de flujo del agua, puede aportar un dato de interés acerca de la convergencia o divergencia del flujo a su paso por la celda considerada, así, formas cóncavas (es decir valores negativos) indican una convergencia neta del entorno de la celda hacia el

centro de la misma, dándose un aumento de concentración de flujo, mientras que las formas convexas (valores positivos) suponen procesos por completo opuestos a los anteriores (Figura 5, Olaya, 2004).

Las curvaturas como tales indican la morfología cóncava o convexa del punto analizado de acuerdo con una dirección dada (Figura 6), sin embargo, para dar una visión más efectiva de la realidad geomorfológica de la celda, es necesario considerar conjuntamente las antes dichas curvas (Olaya, 2004; Shary et al., 2005). La forma cóncava viene asociada con una capacidad para albergar escorrentía, llevando rápidamente a la conclusión de que la concavidad puede asimilarse a un proceso acumulación, mientras las curvaturas convexas pueden asimilarse a un proceso de dispersión (Olaya, 2004). Si se consideran conjuntamente las dos curvas anteriores, la pendiente y la orientación, se puede dar una definición muy completa del terreno desde el punto de vista morfológico (Olaya, 2004). En retrospectiva la interpretación conjunta de las dos anteriores curvas genera una mejor descripción de las características físicas de una cuenca de drenaje, principalmente para el entendimiento de los procesos de erosión y escorrentía (Olaya, 2004), la interpretación de la pendiente muestra el efecto de la tasa general de movimiento descendente de la erosión y escorrentía y la interpretación de la orientación define la dirección del flujo, el desarrollo del modelado de estas variables en un mapa generaría una mejor comprensión de la escorrentía e hidrología superficial del terreno, creando una idea de zonas a una mayor vulnerabilidad a inundaciones.



**Figura 5.** Los dos mecanismos de acumulación

Tomado de Olaya (2004)

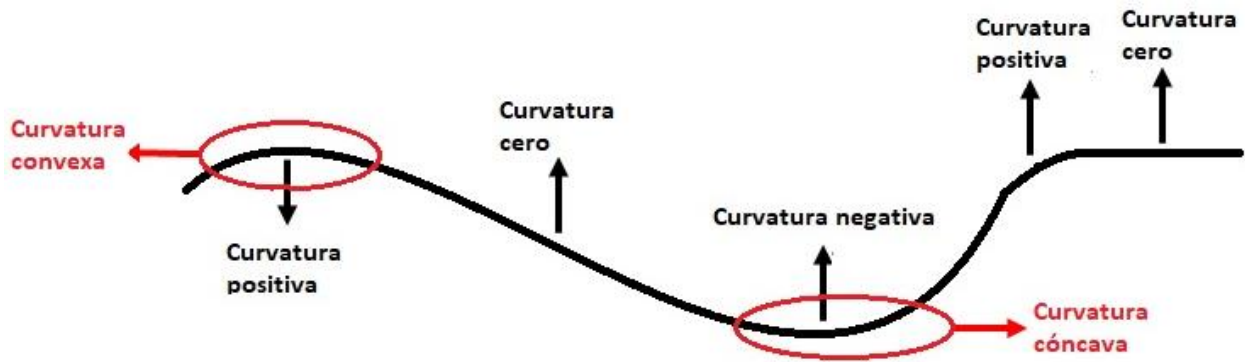


Figura 6. Morfología cóncava y convexa del punto analizado

Modificado de Roberts (2001)

## 5. Infraestructuras Verdes (IV)

Las raíces del término infraestructuras verdes (IV) data desde hace 150 años con los esfuerzos por la planificación y la conservación (Benedict & McMhon, 2006), refiriéndose, a principios, como áreas verdes (AV) y vías verdes (VV), bajo dos conceptualizaciones importantes, (1) vincular parques y otros espacios verdes en beneficio de las personas, y (2) preservar y vincular áreas naturales para beneficiar a la biodiversidad y contrarrestar la fragmentación del hábitat (Benedict & McMhon, 2006). Sin embargo, es desde el año 1900 que remonta el uso del término IV (Benedict & McMhon, 2006), y es hasta inicios de las últimas décadas que el mismo inicia a tomar fuerza en el campo de diseño y planificación de ambientes urbanos y periurbanos (Tzoulas et al., 2007; Eisenman, 2013), principalmente en el Reino Unido, América del Norte y Europa (Mell, 2008). Los trabajos de Frederick Law Olmsted en Norte América (New York y Boston) y el de Ebenezer Howard en el Reino Unido, son señalados por diversos autores como fundamentales para el desarrollo del pensamiento de las IV (Benedict & McMhon, 2006; Mell, 2008), al ser los primeros ejemplos en promover la integridad de la forma y la función de los espacios verdes a la multifuncionalidad del paisaje (Mell, 2008).

El término IV fue establecido para enfatizar su diferencia con las prácticas de conservación tradicionales y la necesidad de cambiar la perspectiva tradicional sobre la planificación del espacio verde, debido al interés y necesidad de la sociedad de conservar el capital natural ante el temor de

los efectos del CC (Gámez 2005; Benedict & McMhon, 2006). Divergiendo en diversos puntos con las AV y VV, entre ellos (Benedict & McMhon, 2006):

- Las AV y las VV a menudo se relaciona con el confort y la recreación, es visto como algo agradable de tener, en cambio las IV enfatiza la ecología, se relaciona con el sistema de soporte de la vida natural, volviéndose una necesidad e implica algo que se debe tener, proteger y restaurar.
- El AV a menudo se considera como parques aislados, sitios de recreación o áreas naturales, el término IV enfatiza sistemas interconectados de áreas naturales y otros espacios abiertos que están protegidos y gestionados por los beneficios ecológicos que proporcionan a las personas y el medioambiente.
- La IV incluye grandes centros ecológicamente importantes, así como enlaces clave al paisaje. Las VV, por otro lado, por lo general se centran en senderos, corredores de conservación estrechos y otras características lineales.
- El AV a menudo se considera autosostenible (independiente), el término IV implica algo que debe mantenerse activamente.

El término IV fue conceptualizado en la reunión llevada en agosto de 1999 bajo la dirección del Fondo para la Conservación y el Servicio Forestal del USDA, como: “una red interconectada de las vías fluviales, humedales, bosques, hábitats de vida silvestre, y otras áreas naturales; vías verdes, parques y otras áreas de conservación; trabajando granjas, ranchos y bosques; y el desierto y otros espacios abiertos que soportan las especies nativas, mantienen los procesos ecológicos naturales, que sostienen los recursos de aire y agua, y contribuyen a la salud y la calidad de vida de las comunidades”. De manera más simple y generalizada Benedict y McMahan (2006) lo definen como, “una red interconectada de espacios verdes que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y provee beneficios asociados a la población humana”, añadiendo además que IV es considerado como el marco ecológico necesario para la sostenibilidad, al incorporar principios tales como preservación y la recreación de las características del paisaje natural, implementando algunas infraestructuras in situ que trabajan con la naturaleza para mejorar los servicios ecosistémicos (Liu, Chen y Peng, 2014).

Las IV incluye jardines de lluvia o áreas de retención, pavimentos permeables, bioswales, techos verdes, recortes de acera de aguas pluviales para recoger y dirigir las escorrentías en las áreas de

detención, recolección de aguas pluviales con barriles de lluvia o cisternas para uso posterior y desconexión de los bajantes de las tormentas (Center for Neighborhood Technology, 2010). Los espacios verdes y abiertos urbanos son los lugares donde las IV (con todos sus procesos ecológicos y beneficios) toman principal contexto en el ambiente urbano y periurbanos (Gill et al., 2007; Lundy & Wade, 2011), por lo tanto, las IV es una iniciativa integradora y no fragmentadora, que soportan los intereses ecológicos, económicos y sociales, mejorando la calidad de vida, el lugar y el medio ambiente; en consecuencia las ideas de multifuncionalidad del paisaje e importancia de comprender la forma y función del paisaje han sido fuertemente consideradas en las investigaciones sobre IV (Mell, 2008).

En los años setentas la UNESCO crea el programa sobre el Hombre y la Biosfera (programa MAB, por sus siglas en inglés; UNESCO, s/f), el cual busca establecer bases científicas para cimentar a largo plazo el mejoramiento de las relaciones entre las personas y el ambiente, fijando los lineamientos de una nueva gestión ecológica-antropológica de la problemática urbana (al menos en Europa), entre los que se destacan (a) la necesidad de desarrollar modelos de relación entre los procesos y técnicas de urbanización y el cambio ambiental; (b) estudiar las migraciones y cambios demográficos introducidos por la urbanización, en particular, en la interface campo-ciudad; (c) realizar estudios pilotos y demostrativos en la ciudad y su “hinterland”, para reducir la presión y el impacto urbano en el medio rural; y (d) innovar en la planificación y gestión de los espacios verdes urbanos y en los espacios abiertos (Gámez 2005). En la década de 1990, Florida, Maryland y varios otros estados y comunidades reconocieron que estos sistemas espaciales verdes interconectados representan el sistema vital para su futuro sostenible, porque proporcionan una forma de vincular la planificación del uso de la tierra con la preservación de la biodiversidad (Benedict y McMahon, 2006). En 1999 el Consejo Presidencial sobre el Desarrollo Sostenible, en su informe “Hacia una América Sostenible” (Towards a Sustainable America), identificó la IV como una de las cinco áreas estratégicas que brindan un enfoque integral para el desarrollo comunitario sostenible (Benedict y McMahon, 2006). Luego más reciente, la Unión Europea lanzó una estrategia para promover las IV, planteando esta como una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otras características ambientales, la cual se diseña y administra para ofrecer una amplia gama de servicios ecosistémicos y para proteger la biodiversidad tanto de zonas rurales como urbanas, teniendo como meta al año 2020 la restauración de al menos el 15% de los ecosistemas degradados, manteniendo y enlazando los ecosistemas y sus servicios, mediante las IV

(Arcidiacono, Ronchii & Salata, 2016). Apoyando estas iniciativas diversos autores, entre ellos, Diamantini y Zanon (2000), Arcidiacono, Ronchii y Salata (2016) y Ong (2003), señalan que la definición e implementación de las IV, basados en sus múltiples servicios, son un elemento clave de la planificación ambiental orientada a mantener y restaurar el capital natural al considerar de forma activa la interrelación entre aspectos sociales y ecológicos, principalmente, sin omitir los aspectos económicos generados por los sistemas naturales (Heredia, 2012).

### **5.1. Impacto de las IV en la escorrentía superficial del paisaje urbano y periurbano**

Las IV se caracterizan por integrar el concepto de multifuncionalidad del paisaje (Mell 2008), al reconocerse la gran variedad de beneficios brindados por las mismas, por ejemplo, el manejo de aguas pluviales, escorrentía, infiltración, mejora de la calidad del aire, estética de la ciudad, reducción de los efectos de isla de calor, niveles de ruido, posibilitan la recuperación de las especies vegetales y la circulación de la fauna (Guerrero y Culos, 2007; Walmsley, 2006; Rodríguez, 2007; Benedict y McMahon, 2006). Recientemente las IV se han convertido en una estrategia de gestión de aguas residuales y aguas pluviales (Fletcher et al., 2015), aprovechando las propiedades del suelo y la vegetación para mejorar la capacidad de retención de la cuenca hidrográfica (Berland et al., 2017), particularmente para las ciudades que experimentan graves inundaciones y peligros hídricos (Yao et al., 2015).

Las IV compuestas por árboles, arbustos y césped (múltiple estratos; Calvo-Alvarado et al., 2012), influye positivamente en la hidrología urbana al retener mejor la escorrentía en el suelo, a través de una mayor infiltración en las zonas de raíz y suelo, así como la intercepción de la copa y estructuras de los árboles (Malagnoux, Sene & Atzmon, 2007; Calvo-Alvarado et al., 2012; Sheridan et al., 1999; Gill et al., 2007; Zhang et al., 2012). Las IV compuestas por múltiples estratos vegetales pueden retener de cuatro a cinco veces más volumen de agua de lluvia, en comparación de aquellas compuestas por un solo estrato (Reid et al., 1999). Forman y Collinge (1995) desarrollaron un enfoque teórico acerca de cómo se debe planificar el paisaje, en el cual apuntan a que la principal cubierta del paisaje por considerar debe ser la forestal, señalando que los atributos más importantes de la diversidad biológica y los procesos ecológicos se pueden mantener con tal cubierta, sin

embargo, pese a que el arbolado urbano es uno de los mecanismos más conocidos y aplicados, su función ecológica no parece estar suficientemente definida (Bettini, 1998).

El efecto de las IV sobre la hidrología del paisaje urbano se ha predicho y estimado, utilizando modelos como UFORE-Hydro (Wang et al., 2008) y el modelo de número de curva (Koch 2005) en cuencas urbanas, obteniendo que el aumento de cobertura arbórea entre 5% a un 40% disminuiría la escorrentía total en un 3.4% (Wang et al., 2008), e incluso Koch (2005) predijo que la presencia de un 22% de cobertura reduce la escorrentía en un 7%. Whitford et al., (2001), obtuvo que en áreas residenciales con espacios verdes y una cobertura de 10% a 50%, el coeficiente de escorrentía varía entre 0.2 y 0.8 en eventos de 12 mm. Además de estos estudios gran cantidad de investigadores han desarrollado trabajos referidos al impacto de las IV sobre la hidrología del paisaje, principalmente en la última década, algunos de estos se muestran en el (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Estudios referidos al impacto de las IV sobre la hidrología del paisaje

<b>Autor</b>	<b>Descripción</b>
Yang, You, Ji y Nima (2013)	Investigaron los efectos de los espacios verdes urbanos en la escorrentía de las aguas pluviales, usando datos experimentales de laboratorio de columnas de suelo en Tianjin, China, concluyendo que la conservación de los espacios verdes urbanos podría ser un medio para minimizar el volumen de escurrimiento de aguas pluviales.
Coutu y Vega (2007)	Verificaron que una pérdida de bosques aumentó el escurrimiento superficial en el condado de Chester, Pensilvania, usando la herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT, por sus siglas en inglés).
Highfield (2012)	Encontró que un aumento del uno por ciento en matorrales/arbustos podría disminuir los caudales anuales máximos en 16,9 a 18,7 % en la costa de Texas.
Gill et al. (2007)	Determinaron que una red de espacios verdes puede reducir el escurrimiento superficial y aumentar la infiltración de aguas, utilizando un modelo de intercambio de energía.
Brody et al. (2013)	A pesar de no evaluar directamente los efectos de la IV, estudiaron las influencias de los patrones de desarrollo, a menudo llamados “cobertura impermeable”, sobre las inundaciones, usando datos de pérdida de inundación. Concluyeron que los patrones desarrollados, conectados y agrupados dan como resultado una disminución en las pérdidas relacionadas con las inundaciones.
Fox et al. (2012)	Revelaron que los impactos hidrológicos de la urbanización, tales como la escorrentía y el cambio de flujo máximo, no fueron significativos en una cuenca mediterránea debido a la gran cantidad de espacios verdes y la forestación.
Brody, Gillis-	Evaluaron varios indicadores ecológicos respecto al grado de resiliencia ante

Peacock Gunn (2012)	y	pérdidas por inundaciones.
Brody Highfield (2013)	y	Examinan estadísticamente el rendimiento del espacio abierto dedicado a la mitigación de inundaciones a través de una muestra. Concluyendo que cuando se controlan variables ambientales, socioeconómicas y políticas, la protección de espacios abiertos, se convierte en una herramienta importante para mitigar los impactos adversos de las inundaciones.
Nedkov Burkhard (2012)	y	Mediante el uso de modelos hidrológicos KINEROS y la herramienta GWA AGWA se evaluaron las capacidades de los diferentes ecosistemas para regular las inundaciones. Concluyendo que la combinación de datos de diferentes fuentes con modelos hidrológicos proporciona una base de datos adecuada para la evaluación de relaciones complejas función-servicio-beneficio.
Liu, Chen, Peng (2014)	y	Desarrollaron un modelo de simulación a escala comunitaria para cuantificar la efectividad del IV en la reducción del volumen de flujo máximo e inundación urbana, en cinco escenarios distintos. Los resultados de la simulación mostraron que las superficies impermeables tienen la mayor contribución a los escurrimientos de tormenta de la comunidad y el escenario con configuración de IV integrada tiene un porcentaje de reducción de escorrentía efectivo.
Zimmermann & Bracalenti (2014)		Presenta un método para estimar un indicador que permita cuantificar la magnitud del impacto de las AV en el escurrimiento pluvial de una cuenca urbana.
Yao et al. (2015)	al.	Se evalúa las reducciones de escorrentía superficial asociados con el espacio verde urbano del centro de Beijing, bajo un escenario verde, utilizando el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos. Resulta que los espacios verdes retuvieron más de un 30% de la escorrentía, añadiendo casi un 11% más de cubierta arbórea. Concluyendo que los espacios verdes urbanos tienen un potencial importante en la mitigación de la escorrentía y que estos deben de combinarse con medidas compensatorias y complementarias, para mejores resultados.
Wong & Jim (2014)		Concluyeron, por un lado, que la contribución de los techos verdes para la retención de aguaceros torrenciales es finita (limitada). Por otro lado, pueden ofrecer una mejor estrategia para la detención de aguas pluviales. Al resultar que el pico de retraso y reducción aún se pueden observar después del agotamiento de la retención del techo verde, especialmente cuando los eventos contienen pausas intermitentes.
Jurczak et al. 2018	al.	Proponen un sistema híbrido (combinado de ingeniería y medidas biológicas), que consiste en un sistema de separadores subterráneos que se combina con un sistema secuencial de sedimentación-bioinfiltración (SSBS), para retener y purificar la escorrentía de aguas pluviales desde una calle que se dirige directamente a una cascada de embalses recreativos. Sus resultados demostraron la reducción de 86% del total de sólidos suspendidos, el 71.5% del nitrógeno total, el 66.7% del fósforo y de 40.7% y 78.3% de $PO_4^{-3}$ y $NO_2^{-1}$ , respectivamente. Además, se demostró que el sistema reduce el estrés hidráulico inducido por descargas extremas y descargas mitigadas para cantidades de precipitación inferiores a 9 mm.
Zhang et al. (2015)	al.	Mediante la medición de 19 muestras de escorrentía de eventos de lluvias examinaron la capacidad de retención de aguas pluviales, de un techo verde en Chongqing, China. La retención anual de escorrentía del techo verde mostró que el

---

volumen y la tasa de retención alcanzaron 758.7 mm y 68.0%, respectivamente.

---

Lee et al. (2015) Construyeron ensambles piloto de techos verdes en un entorno urbano. Obtuvieron como resultado una reducción de escorrentía entre 42.8% y 60.8% para 200 mm de profundidad del suelo y de 13.8% a 34.4% para una profundidad de 150 mm. No obstante, demostraron que la alta intensidad de lluvia tiene una relación negativa con el tiempo de ocurrencia retardada, sugiriendo que el aumento de días secos anteriores puede ayudar a mejorar la capacidad de retención de agua y retrasar el tiempo de ocurrencia.

---

Mentens, Raes y Hermey (2006) Resumiendo los estudios en Alemania de 1987 a 2003, concluyeron que los techos verdes intensivos reducen la escorrentía anual en un 65-85% de la precipitación anual (100%), mientras que para techos extensos, los valores correspondientes eran 27-81%

---

Gregoire y Clausen (2011) Resumieron parte de la literatura existente a través de un metanálisis y encontraron que extensos techos verdes construidos para reducir la escorrentía de aguas pluviales son capaces de interceptar, retener y evapo-transpirar 34-69% de la precipitación, con una retención promedio tasa de 56%

---

Gonzalez-Sosa et al. (2017) El estudio propone una metodología para evaluar el valor ecohidrológico de árboles aislados ubicados en calles y avenidas. Utilizando el modelo de interceptación de Rutter, ejecutado en un paso de tiempo corto, para calcular la interceptación de los árboles de la calle. El método Rational y el hidrograma unitario adimensional (DUH) se utilizan para calcular el hidrograma asociado al mismo tiempo. Los resultados mostraron que el bosque urbano y el sistema de alcantarillado combinados, permiten la reducción y mitigación del flujo terrestre por superficies impermeables en un 10-20% y el retraso pico se estima en 10-15 minutos.

---

Berland & Hopton (2014) Desarrollaron un estudio para comprender los patrones y los impulsores de la heterogeneidad estructural de los ensambles urbanos de los árboles en calles. Mediante la comparación de la estructura de los árboles en nueve comunidades a lo largo del gradiente geográfico y demográficos en el área metropolitana de Cincinnati, Ohio, EE. UU. Usaron estimaciones moderadas de interceptación de aguas pluviales de i-Tree Streets, para comprender las implicaciones de la heterogeneidad de los ensambles de los árboles en los beneficios de interceptación de aguas pluviales. Concluyendo que la estructura forestal de los árboles en las calles varió entre las comunidades en relación con las prácticas de mantenimiento, es decir, la participación en el programa Tree City USA. Resultando una discrepancia en la interceptación estimada de aguas pluviales entre los participantes de Tree City USA (de 128.7m<sup>3</sup> / km longitud de calle) y los no participantes (59.2m<sup>3</sup> / km).

---

## **5.2. Rol del componente forestal en la cuenca hidrográfica**

La cuenca hidrográfica es reconocida como la unidad de manejo (Benegas et al., 2014) y es aceptado que las cuencas con amplia cobertura boscosa reducen la escorrentía superficial, erosión, sedimentación, estabilizan los márgenes fluviales, recicla nutrientes y filtra los contaminantes (García, 2007), por lo cual el manejo forestal (en todo su campo) y la restauración de zonas degradadas, han tomado particular importancia en las directrices sobre el CC (FAO, 2013a). La silvicultura adaptativa, hidrológica, urbana y en general la silvicultura de vanguardia, ha tratado de comprender y adaptar las masas forestales para generar una mejor gestión del recurso hídrico, mediante la regulación artificial y espesura de la masa forestal (González et al., 2013).

El desarrollo de la silvicultura como tal data del siglo XVIII, influenciada por las necesidades socioeconómicas de la época (Puettmann, Coates, & Messier, 2016), principalmente por los cambios de la economía europea (de una agrícola a una industrial) que condujeron a una demanda creciente de madera para energía y construcción, adicionado a la filosofía del libertarismo económico que priorizaba la maximización de la producción de madera, reflejándose en prácticas homogeneizadoras de los paisajes, tamaño de los rodales, turnos y patrones de corta (Bannister & Pyttel, 2010; Puettmann, Coates, & Messier, 2016). El surgimiento de las primeras escuelas forestales en Alemania, Rusia, Francia, Suecia y más tarde Finlandia, Gran Bretaña y Estado Unidos, permitió el reconocimiento de la silvicultura como disciplina (Bannister & Pyttel, 2010; Puettmann et al., 2016), que posteriormente con el establecimiento de la ecología como ciencia en el siglo XIX, y desarrollo de estudios en temas como botánica, climatología, suelos e importancia de las características del sitio en el crecimiento de los árboles, en el siglo XX, se incorporan los conocimientos de la ecología en la literatura silvicultural (Bannister & Pyttel, 2010). Este nuevo conocimiento impulsó, en los años noventa, prácticas silviculturales dirigidas a la conservación de la gama completa de valores y funciones de los bosques a nivel del paisaje, debido a la creciente preocupación sobre la conservación de los recursos y temáticas ambientales (Günter et al., 2012; Puettmann et al., 2016, Montes, 2014).

Los nuevos enfoques silviculturales han asumido el propósito de superar el enfoque reduccionista y direccionarse a uno multiplicador y no determinístico, adquiriendo enfoques más amplios e íntegros que el de solo madera, procurando que los paisajes sean más resilientes y mejor adaptados a las condiciones bióticas y abióticas actuales y futuras (Puettmann, Coates, & Messier, 2016; Montes,

2014). Las masas forestales han adquirido un importante papel en la regulación hidrológica de los paisajes (Benegas et al., 2014), surgiendo diversos términos de manejo, tales como: multifuncionalidad, diversificación, adaptabilidad, sostenibilidad, multiescala, intensificación del manejo, responsabilidad social y silvicultura intensificada, así como nuevas tendencias silviculturales, tales como silvicultura adaptativa, hidrológica, urbana y arboricultura (Pique & Vericat, 2014; Sist, Gourlet-Fleury, & Nasi, 2011; Sánchez & Navarrete, 2017; Montes 2014; Puettmann et al., 2016; Günter et al., 2012).

El papel de las masas forestales en la hidrología del paisaje se ha puesto de manifiesto en diversos estudios sobre la interceptación de las precipitaciones, la evapotranspiración, infiltración, escorrentía y en general con el balance hídrico (Gupta & Usharani, 2009; Algeet-Abarquero et al., 2015; Benegas et al., 2014; Zhin-Bin et al., 2014; Zimmermann, Papritz & Elsenbeer, 2010; Zwartendijka et al., 2017; Calvo-Alvarado, Jiménez-Rodríguez & Saa-Quintana, 2012; Sheridan, Lowrance & Bosch, 1999; Calder et al., 2007; Stadtmuller, 1994; Mintegui et al., 2009; Malagnoux & Atzmon, 2007). La importancia del componente forestal en el ciclo del agua, es tal que de acuerdo al manejo dado garantiza o no la disponibilidad del recurso hídrico, o bien, garantiza o no la resiliencia del paisaje ante eventos hidrometeorológicos (Mintegui, et al., 2009; Vigiak, Ribolzi, Pierret, Valentin, Sengtaheuanghoung, & Noble, 2007).

La recuperación de tierras degradadas y compactadas mediante la reforestación, mejoran las propiedades básicas como la disponibilidad de materia orgánica, macroporosidad del suelo, cohesión del suelo, capacidad de infiltración e interceptación de precipitaciones (Zimmermann & Bracalenti, 2014; Bruijnzeel, Bonell, Gilmour & Lamb, 2005). En bosque húmedos se ha estimado que una cobertura arborea del 66% incrementa la capacidad de infiltración y percolación de las precipitaciones (Botey, 2013), a priori, si se orientan las prácticas al uso de múltiples estratos vegetales (Calvo-Alvarado et al., 2012), proporcionando una mayor rugosidad al terreno. Además, de los estratos arbóreos y arbustivos, un tapiz herbáceo (Malagnoux, Sene & Atzmon, 2007; García, sf.; Calvo-Alvarado et al., 2012; Sheridan et al., 1999), es muy eficiente ante la tensión de arrastre que ejerce el flujo de agua, gracias a la alta densidad de tallos y sistema radical el cual permite que el flujo que se aproxima a un tallo sea desviado lateralmente, produciendo un efecto de contracción que es favorecido cuanto más cercan estén los tallos, produciendo una pérdida en la carga del fluido, por lo tanto, menor energía, velocidad y poder destructivo del líquido (García, sf). Se ha estimado que un tapiz herbáceo puede capturar entre 60% y 90% de los sedimentos y reducir la escorrentía

entre 50% a 72% (Sheridan et al., 1999; Díaz, 2011). Esta eficiencia se ve limitada al largo plazo (Sheridan et al., 1999), recalcando la importancia de la implementación de cierta diversidad de estructura y composición ya que los estratos arbóreos vienen a cumplir una función análoga a la descrita con los céspedes (pero quizá a una escala y longevidad mucho mayor).

### **5.3.Efecto de arbolado en la escorrentía superficial del paisaje urbano y periurbano**

Los hallazgos de Roy, Byrne y Pickering (2012) en 33 revistas de diversas disciplinas que incluyen: silvicultura, planificación del uso de la tierra, ecología y economía, han demostrado que la investigación sobre árboles urbanos se ha concentrado geográficamente en América del Norte (el 64% de los estudios). Además la mayoría de estudios (91,3%) usaron investigación cuantitativa y la mayoría de estos (60%) emplearon métodos de ciencias naturales, demostrándose en ellos los beneficios del árbol en aspectos económicos, sociales, de salud, visuales y estéticos, así como el ofrecimiento de servicios ecosistémicos como: captura de carbono, mejora de la calidad del aire, atenuación del agua de tormentas y conservación de la energía. En los últimos años, la ciencia y la práctica de la IV se han centrado principalmente en tecnologías diseñadas para facilitar la infiltración de aguas pluviales (Berland et al., 2017), ante la necesidad de aumentar el volumen de pérdidas del ciclo hidrológico en sistemas urbanos (Yao et al., 2015).

Los árboles son un claro candidato para aumentar las pérdidas de agua pluvial en el paisaje, mediante la interceptación del dosel, la transpiración, la infiltración mejorada y los posibles beneficios con respecto a la percolación más profunda a lo largo de los canales de la raíz y el manejo de la capa freática (Berland et al., 2017), al proporcionar una vegetación relativamente densa con extensos doseles y sistemas de raíces subsuperficiales capaces de capturar y bombear cantidades sustanciales de agua (Mintegui et al., 2009; Berland et al., 2017). Estas pérdidas ocurren en diferentes escalas de tiempo; por ejemplo, la pérdida por interceptación del dosel es relevante durante e inmediatamente después de un evento de tormenta, mientras que la evapotranspiración desempeña un papel en la gestión de la humedad del suelo en los días o semanas entre los eventos de tormentas (Berland et al., 2017), por ende, es necesario dirigir más atención a la comprensión del papel de los árboles urbanos como una medida de control de aguas pluviales.

Diversos estudios han estimado la pérdida de interceptación de los árboles urbanos, por ejemplo, la interceptación en propiedades residenciales con cobertura relativamente alta del dosel en Carolina del Norte, EE. UU., se estimó entre 19,9 a 21,4% de la precipitación total, con base en promedios de 14 tormentas (Inkiläinen, McHale, Blank, James, y Nikinmaa, 2013). Xiao, McPherson, Simpson y Ustin (1998) estimaron que el bosque urbano en Sacramento, California, EE. UU., intercepta el 1,8% de la precipitación anual bruta en toda la ciudad, bajo una cobertura de dosel de un 14%. Xiao y Mcpherson (2003) informaron el impacto de 29 299 árboles situados en parques y calles de Santa Mónica, California, descubrieron que el volumen anual interceptado por cada árbol fue de 6.6 m<sup>3</sup> o 1,6% de la precipitación anual. La pérdida de la interceptación del arbolado varía según los atributos del árbol, la fenología y las condiciones meteorológicas (factores tales como la intensidad, la duración y el tiempo entre las tormentas), afectando la medida en que un árbol puede detener o almacenar agua (Inkiläinen et al., 2013). Xiao y McPherson (2016) demostró que el almacenamiento de agua en las superficies de los árboles aumentó con una intensidad de lluvia de hasta aproximadamente 80 mm<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> y el almacenamiento se estabilizó a intensidades más altas. Van Stan et al. (2015) muestra que en las primeras etapas de un evento de precipitación la interceptación es mayor y disminuye después de que las superficies de los árboles se saturan con agua.

La evapotranspiración (ET) representa la pérdida más grande en las ecuaciones de balance hídrico (Berland et al., 2017), afectando además la escorrentía, la sedimentación y en general el dinamismo torrencial de la cuenca (Mintegui et al., 2009). Cleugh, Bui, Simon, Xi y Mitchell (2005) utilizaron un modelo urbano calibrado del ciclo del agua en Valle de Woden, Australia, y observaron que la ET urbana fue el término de mayor rendimiento (81% de la precipitación a 510 mm por año) entre todas las variables relevantes. Pataki et al. (2011), estimaron las tasas de ET del bosque urbano de la región metropolitana de Los Ángeles, California, EE.UU., y observaron diferencias sustanciales entre especies. Kjelgren y Montague (1998) encontraron que los árboles que crecen alrededor de asfalto poseen tasas de ET más altas (30% mayores) respecto a los que crecen sobre césped.

La expansión de las raíces es especialmente importante para generar canales en el suelo para facilitar la infiltración (Berland et al., 2017). En un experimento de invernadero, las raíces arbóreas penetraron subsuelos compactados, para imitar las condiciones del suelo en entornos urbanos, resultando que la presencia de árboles aumentó la infiltración en un 63% en promedio, en comparación con los controles sin árboles (Bartens, Day, Harris, Dove & Wynn, 2008). Si bien la

pérdida de interceptación del dosel y ET pueden ser los medios principales por los cuales los árboles proporcionan control directo de las aguas pluviales, también los árboles pueden mejorar la infiltración, modulando el ecosistema del suelo a través del crecimiento y la senescencia (que pueden crear macropores contiguos), mayores insumos de materia orgánica y mayor actividad microbiana, estabilizando la formación de la estructura del suelo (Berland et al., 2017).

## IX. MARCO METODOLÓGICO

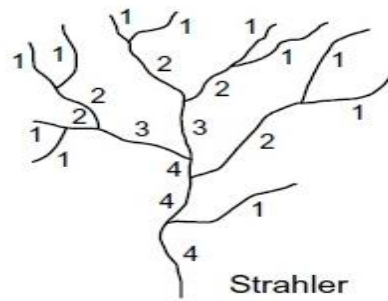
### 1. Objetivo 1. Caracterización morfométrica y biofísico de la subcuenca

#### 1.1. Delimitación de las microcuencas y obtención de datos geospaciales

La cuenca hidrográfica corresponde al espacio de terreno limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, es decir, por el parte aguas o divisoria de aguas. El cual se puede delimitar en una carta altimétrica, siguiendo las curvas de nivel (Faustino & Jiménez, 2000; Jiménez, 2001). La red de drenajes y la delimitación de la cuenca se definieron a partir de la topografía de la subcuenca, con base en las curvas de nivel digitalizadas previamente de las hojas cartográficas escala 1:10 000 del PRUGAM (PRUGAM & UE, 2005), creando un vector lineal para la red de drenajes y uno poligonal para la subcuenca. Obtenido el polígono de la subcuenca se calculó los insumos geospaciales: área ( $A$ ), perímetro ( $P$ ), áreas parciales ( $Apr$ ), longitud máxima de la subcuenca ( $Lmax$ ), ancho máximo de la subcuenca ( $Wmax$ ), orden de las corrientes ( $Or$ ) y longitud del cauce principal ( $Lcp$ ) (Cuadro 2). Posterior a ello se delimitaron las microcuencas, cada una se delimitó a partir de cada cauce conecta directamente con el cauce principal, siguiendo la misma metodología descrita con anterioridad para cada microcuenca.

**Cuadro 2.**Procedimiento para obtener los datos geospaciales

<b>Variables</b>	<b>Procedimiento</b>
$A$ y $P$	Se digitaliza el polígono de la cuenca y mediante geoprocésamiento en un SIG se calcularon las variables.
$Apr$	Mediante herramientas de geoprocésamiento se hace un recorte del polígono de la subcuenca en sobreposición del vector lineal de las curvas de nivel, obteniendo los polígonos de las áreas entre cada curva de nivel.
$Lmax$	Según el método de Ongley (Zăvoianu, 1985), ubicando el centroide del polígono de la cuenca y a partir de este crear un círculo, de modo que los extremos de la cuenca queden inscritos en el polígono circular. Siendo el diámetro del círculo igual a la longitud máxima de la cuenca.
$Wmax$	A partir de una malla de líneas horizontales a intervalos de un metro, inscrita al polígono de la cuenca, se les calcula la longitud, mediante geoprocésamiento (calculadora geométrica). Siendo la de mayor valor la correspondiente al ancho máximo de la cuenca.
$Or$	Se utilizará el sistema propuesto por Strahler (1957), digitalizando cada corriente y calculando su longitud mediante geoprocésamiento. Este consiste en que todos los afluentes de borde de la cuenca se clasifican como corrientes de primer orden, las corrientes de segundo se forma por la unión de dos corrientes de primer orden, las de tercer orden se dan por la unión de dos corrientes de segundo orden y así hasta ubicar la última corriente. Si se da la unión de corrientes de diferente orden se continúa con la corriente de mayor orden.



## 1.2. Cuantificación de Parámetros morfométricos

Obtenidos los datos geoespaciales, se exportan los mismos a una hoja de cálculo (Microsoft Excel 2007), en la cual se calculan los parámetros morfométricos, considerando la definición teórica de ellos. Para lo cual se agruparon en 4 grupos: Parámetros de forma, Parámetros de drenaje, Pendientes y Tiempo de concentración.

### 1.2.1. Parámetros de forma

Se calcularon 4 parámetros de forma, propuestos cada uno por diferentes autores, el índice de compacidad ( $Kc$ ), propuesto por Gravelious, que compara el perímetro de la cuenca con la de una circunferencia cuyo círculo inscrito tiene igual área que la cuenca. Relación de circularidad ( $Rc$ ), propuesto por Miller, que compara el área de la cuenca con la de un círculo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca. Relación de elongación ( $Re$ ), propuesto por Schumm, que relaciona el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. Y el factor de forma ( $Ff$ ), propuesto por Horton, que relaciona el área de la cuenca y el cuadrado del largo de la cuenca (Zăvoianu, 1985; Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Descripción de los parámetros de forma

Parámetro	Formula	Simbología
Índice de Compacidad ( $Kc$ )	$Kc = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$	$P$ = perímetro de la cuenca (km) $A$ = área de la cuenca ( $km^2$ )
<b>Ecuación 1</b>		
Relación de Circularidad ( $Rc$ )	$Rc = 4\pi * \frac{A}{P^2}$	$P$ = perímetro de la cuenca (km) $A$ = área de la cuenca ( $km^2$ ) $\pi= 3,14$
<b>Ecuación 2</b>		
Relación de elongación ( $Re$ )	$Re = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{Lmax}$	$Lmax$ = longitud máxima de la cuenca (km) $A$ = área de la cuenca ( $km^2$ ) $\pi= 3,14$
<b>Ecuación 3</b>		
Factor de Forma ( $Ff$ )	$Ff = \frac{A}{Lmax^2}$	$A$ = área de la cuenca ( $km^2$ ) $Lmax$ = longitud máxima del cuenca (km)
<b>Ecuación 4</b>		

### 1.2.2. Parámetros de drenaje

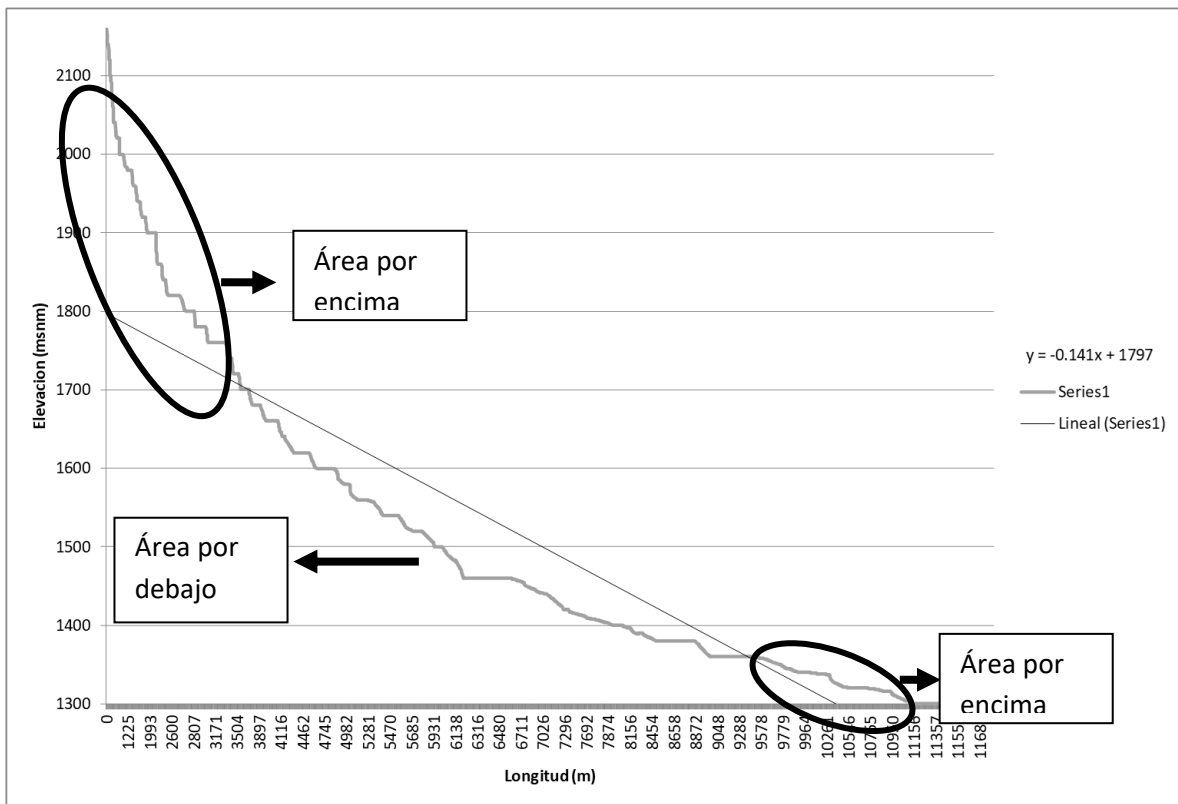
Para caracterizar el drenaje de la cuenca se utilizaron 5 parámetros. El parámetro de Orden ( $Or$ ), propuesto por Strahler, su uso en la clasificación tiene como premisa que el número de corriente tiene alguna relación con el tamaño del área de aporte, para canalizar las dimensiones y el caudal (Strahler, 1957). Una limitación del método de Strahler es que un gran número de afluentes menores puede interceptar una corriente de mayor orden, añadiendo sustancialmente a su descarga, pero no así a su orden de la corriente (Gordon et al., 2004). Parámetro de frecuencia de corriente ( $Fc$ ), propuesto por Horton, relaciona el número total de segmentos acumulados de todos los órdenes de corriente con el área de la cuenca (Zăvoianu, 1985), considerando segmento como la sección de la corrientes donde inicia un tipo de orden hasta donde cambia a otro orden (Snehal et al., 2013). La densidad de drenajes ( $Dd$ ), propuesta por Horton (1945), relaciona la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca, por lo tanto, expresa la cantidad de canal requerido para drenar una unidad de área de captación (Zăvoianu, 1985). La relación de Bifurcación ( $Rb$ ), término introducido por Horton (Zăvoianu, 1985), relaciona el número de corrientes de un orden y el número de corrientes del orden superior. Por último, el parámetro de textura de drenaje ( $Dt$ ), definido por Smith (1950) como la separación relativa de las líneas de drenaje y se expresa según Horton (1945) como la suma total de los segmentos de todo los órdenes entre el perímetro de la cuenca (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Descripción de los parámetros de drenaje

<b>Parámetro</b>	<b>Formula</b>	<b>Simbología</b>
<i>Or</i>	Se obtuvo como se describe en el cuadro 1, y el valor corresponde al mayor número de orden de corriente determinado para la cuenca.	
<i>F<sub>c</sub></i>	$F_c = \frac{N_c}{A}$ <b>Ecuación 5</b>	<i>N<sub>c</sub></i> = número de corrientes o segmentos <i>A</i> =área de la cuenca (km <sup>2</sup> )
<i>D<sub>d</sub></i>	$D_d = \frac{L_d}{A}$ <b>Ecuación 6</b>	<i>L<sub>d</sub></i> = longitud total de los drenajes (km) <i>A</i> = área de la cuenca (km <sup>2</sup> )
<i>R<sub>b</sub></i>	$R_b = \frac{N_i}{N_s}$ <b>Ecuación 7</b>	<i>N<sub>i</sub></i> = número de corrientes del orden dado (orden inferior). <i>N<sub>s</sub></i> = número de corrientes del orden superior al orden dado (orden superior).
<i>D<sub>t</sub></i>	$D_t = \frac{N_u}{P}$ <b>Ecuación 8</b>	<i>N<sub>u</sub></i> = número de segmentos de todos los órdenes. <i>P</i> = perímetro de la cuenca (km)

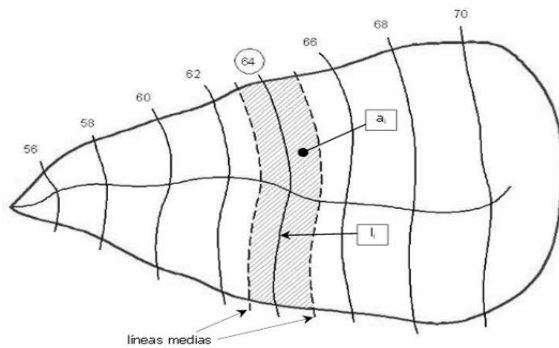
### 1.2.3. Pendiente

El cálculo de la pendiente se realizó tomando en consideración dos criterios, el de compensación de áreas y el de Alvord. Para el primero se consideró lo mencionado por Villón (2004), quien señala que un criterio de naturaleza más real de medir la pendiente en una cuenca, es a partir del perfil longitudinal del cauce, obtenido de un MDT (Modelo Digital del Terreno). Donde la condición es que la recta de mejor ajuste en el perfil compense áreas iguales por encima y por debajo de esta. Para lo cual se determinaron tales áreas en un SIG mediante la referenciación de la imagen, correspondiente al perfil longitudinal del cauce principal, a coordenadas métricas, posteriormente se crearon los polígonos digitalizados de cada área, los cuales se les calculó su área con geoprocésamiento. Siendo así, la pendiente de la recta corresponde a la pendiente de la cuenca (Figura 7).



**Figura 7.** Criterio de compensación de áreas, pendiente del cauce

El segundo criterio, el de Alvord, está basado en la obtención previa de las pendientes existentes entre las curvas de nivel, dividiendo el área de la cuenca en áreas parciales por medio de sus curvas de nivel y las líneas medias de las curvas de nivel (Villón, 2004) (Figura 8). Tales áreas parciales (*Apr*) fueron seccionadas en el paso de la obtención de datos geoespaciales, obtenidos estos se procedió con la aplicación de las ecuaciones Ecuación 9, Ecuación 10 y Ecuación 11.



**Figura 8.** Criterio de Alvord, variables e interpretación

$$W_i = \frac{a_i}{l_i} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$S_i = \frac{D}{w_i} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$S = \frac{\sum S_i * a_i}{\sum a_i} \quad \text{Ecuación 11}$$

Tomado de Villón, 2004

**Donde:**  $W_i$ = Ancho de la franja analizada (km);  $a_i$ = área de la franja analizada (km<sup>2</sup>);  $l_i$ = longitud de la curva de nivel correspondiente a la franja analizada;  $S_i$ =Pendiente de la franja analizada;  $D$ = Desnivel entre líneas medias, equidistancia (Km);  $S$ = pendiente media de la cuenca.

### 1.2.4. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se calculó mediante la fórmula propuesta por Kirpich (1940) en Umaña (2014), la cual se muestra en la ecuación Ecuación 12.

$$Tc = 0,01947 * L^{0,77} * S^{-0,385}$$

Ecuación 12

**Donde:**  $L_c$ = longitud cauce principal (m);  $S$ = Pendiente media (m/m); y  $A$ = área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

## 1.3. Grado de conflictividad del uso de la tierra en las áreas de protección

### 1.3.1. Determinación del uso actual de la tierra

Se llevó a cabo desde la fotointerpretación de imágenes satelitales (Bing y Google EARTH), creando y georreferenciando los vectores poligonales del uso actual de la tierra, clasificándose en bosque, urbano, agropecuario/cultivo y cultivo permanente. Usos de la tierra que se corroboraron en campo mediante puntos estratégicos a lo largo y ancho de la subcuenca.

### 1.3.2. Determinación de las Áreas de Protección

Para la determinación de las áreas de protección (AP) se consideró lo que dispone la Ley Forestal (N° 7575) en su artículo 33 referente a ríos y quebradas (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Consideraciones para definir las AP

AP	Pendiente	Zona de Amortiguamiento (buffer)
AP de ríos y quebradas	Superior a 40%	50 m horizontales ambos lados de borde.
	Inferiores a 40%	15 m horizontales ambos lados de borde en zonas rurales. 10 m horizontales ambos lados de borde en zonas urbanas.

Elaboración propia con datos de la Ley Forestal 7575 de Costa Rica

En consideración a lo anterior, primeramente se crea un mapa de pendientes de la cuenca (en dos rangos  $\geq 40\%$  y  $< 40\%$ ), mediante un modelado digital del terreno (MDT) basado en las curvas de

nivel. Posteriormente se establecieron las zonas de amortiguamiento con herramientas de geoprocésamiento, donde a partir del vector lineal (drenajes) se crea un vector poligonal (zona de amortiguamiento) que abarca una distancia horizontal de 10, 15 y 50 m a ambos lados del drenaje. Siguiendo con la conversi3n de las capas obtenidas (uso actual de la tierra, pendientes y zonas de amortiguamiento) a formato raster, permitiendo el empleo de 3lgebra de mapas, que con sus respectivas sentencias de operadores booleanos (*Y/O*) y operadores relacionales (<, <=, >, >=, ==, !=) se procede a generar las AP de la red de drenajes (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Procedimiento para definir las AP de la red de drenajes

Insumos	Procedimiento	Producto
Buffer10.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en 3lgebra de mapas: <i>(("UsoActual" == urbano) &amp; ("Buffer10" == 1))</i>	AP10.grid
Buffer15.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en 3lgebra de mapas: <i>(("UsoActual" == cultivo_permanente)   ("UsoActual" == agrop_e_cult) &amp; ("Buffer15" == 1))</i>	AP15.grid
Buffer50.grid Pend40.grid	Sentencia de operadores en 3lgebra de mapas: <i>(("Pend40" == 1) &amp; ("Buffer50" == 1))</i>	AP50.grid
AP10.grid AP15.grid AP50.grid	Cada insumo raster se transforma a formato shape (.shp), mediante la herramienta de conversi3n de raster a entidad	AP10.shp AP15.shp AP50.shp
AP10.shp AP15.shp AP50.shp	Todos los insumos en formato shape (.shp) son fusionados y disueltos, a manera de obtener un 3nico pol3gono correspondiente a las AP. Ello se llev3 a cabo mediante el uso de la herramienta de geoprocésamiento "fusionar entidades", primeramente, y luego el uso de la herramienta de geoprocésamiento "disolver".	AP.shp

### 1.3.3. Zonificaci3n de conflicto de uso de la tierra en las AP

La cartograf3a de los conflictos de uso de la tierra en las AP se realiz3 utilizando 3lgebra de mapa, usando de entrada el raster de las AP y el de uso actual de la tierra, marc3ndose como conflicto toda 3rea dentro de las AP que no corresponda a bosque. Posterior e igualmente, con 3lgebra de mapas, se zonific3 los conflictos de uso de la tierra en las AP (Cuadro 7), de acuerdo a las categor3as establecidas:

- Categor3a I: cultivos permanentes.
- Categor3a II: 3reas con usos agropecuarios y cultivos anuales.

- Categoría III: presencia de viviendas, industrias y cualquier otro tipo de infraestructura.

**Cuadro 7.** Procedimiento para la zonificación del conflicto de uso del suelo

Insumos	Procedimientos	Producto
AP.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en algebra de mapas: $((\text{"AP"} == 1) \& (\text{"UsoActual"} == \text{urbano})   (\text{"UsoActual"} == \text{cultivo\_permanente})   (\text{"UsoActual"} == \text{agrope\_cult}))$	Conflictos.grid
Conflictos.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en algebra de mapas: $(\text{"Conflictos"} == 1) \& (\text{"UsoActual"} == \text{cultivo\_permanente})$	Cat_I.grid
Conflictos.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en algebra de mapas: $(\text{"Conflictos"} == 1) \& (\text{"UsoActual"} == \text{agrope\_cult})$	Cat_II.grid
Conflictos.grid UsoActual.grid	Sentencia de operadores en algebra de mapas: $(\text{"Conflictos"} == 1) \& (\text{"UsoActual"} == \text{urbano})$	Cat_III.grid
Cat_I.grid Cat_II.grid Cat_III.grid	Cada insumo raster se transforma a formato shape (.shp), mediante la herramienta de conversión de raster a entidad	Cat_I.shp Cat_II.shp Cat_III.shp
AP.shp Conflictos.shp Cat_I.shp Cat_II.shp Cat_III.shp	Posteriormente a cada insumo se le calculó el área, mediante la herramienta de geoprocésamiento “calculadora geométrica”. El área sin conflicto de uso se calculó mediante una simple resta entre el área del polígono “AP.shp” y el área de “Conflictos.shp”	Áreas en km <sup>2</sup> de la zonificación: categoría I, II y III, el área de las AP (ley 7575) y área sin conflicto y con conflicto de uso.

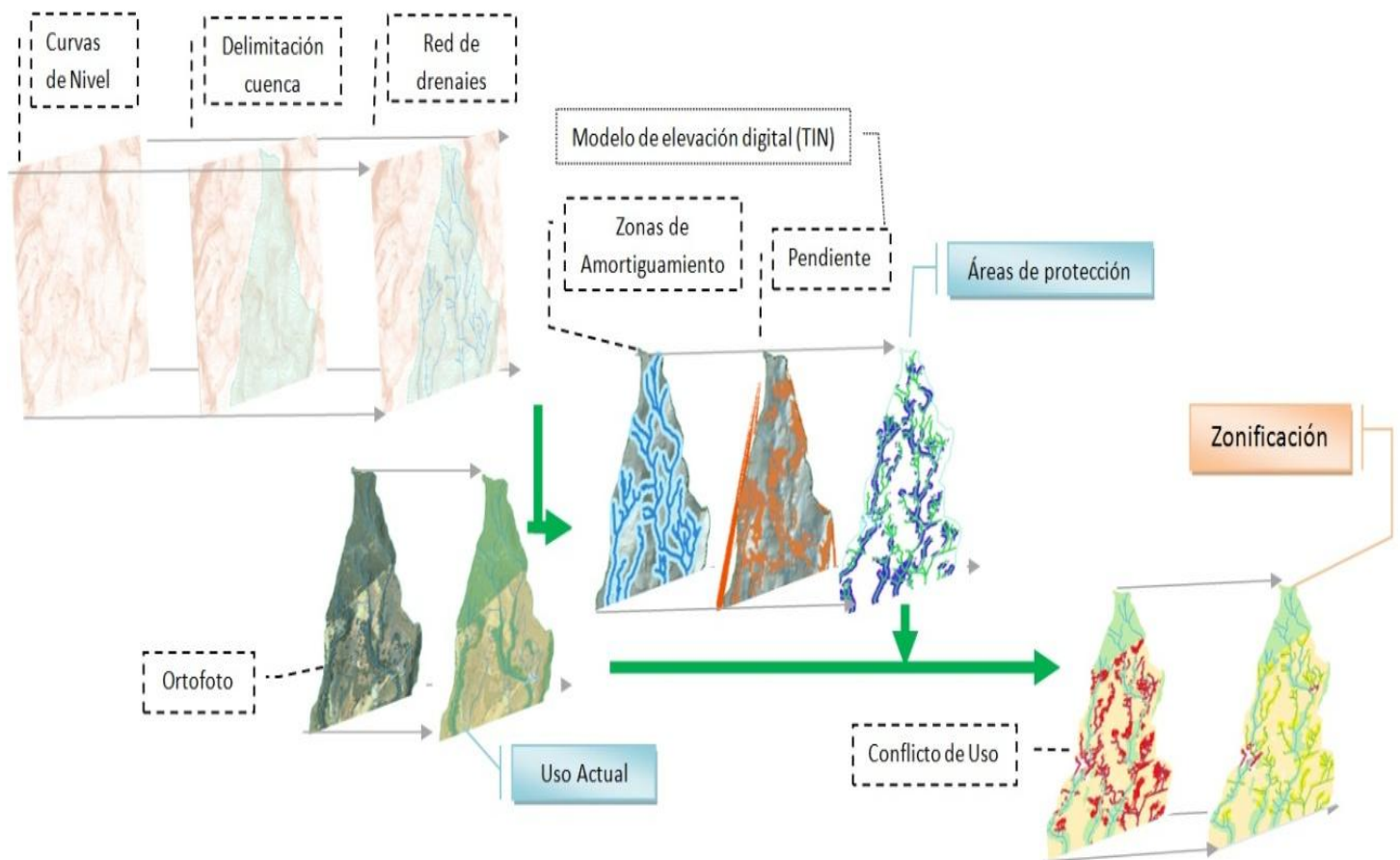
Por último, para cuantificar la conflictividad presente en las AP, se aplicó el indicador “Grado de Conflicto de Uso de la Tierra (*GC*)”, propuesto por Danza y Sanabria (2008). El cual usa como variables las áreas de los conflictos bajo, medio, alto y crecimiento urbano; variables que en el estudio están dadas por: categoría I (bajo), categoría II (medio) y categoría III (alto y crecimiento urbano). La ecuación respectiva para su cálculo es la siguiente (Ecuación 13):

$$GC = \frac{(E + B) - (A + M)}{Aap}$$

**Ecuación 13**

**Donde:** *E*: es el área sin conflicto, *B*: área con conflicto bajo (categoría I), *M*: área con conflicto medio (categoría II), *A*: área conflicto alto (categoría III, incluyéndose en este la variable crecimiento urbano) y *Aap*: área total de las AP.

Los valores resultantes del indicador pueden variar de -1 a 1, donde a menor valor, mayor grado de conflictividad de uso de la tierra poseen las AP y a mayor valor, menor grado de conflictividad. Interpretándose si el valor es igual a 1 la totalidad de las AP se encuentran con cobertura arbórea (están en equilibrio), si es igual a 0, la categoría I y las áreas sin conflicto son iguales a las categorías más conflictivas (II y III). La Figura 9 muestra el diagrama de pasos para la zonificación de conflictos de uso de la tierra e las AP.



**Figura 9.** Diagrama del procedimiento para la zonificación de los conflictos de uso de la tierra en AP

## **2. Objetivo 2. Determinación de zonas con mayor grado de vulnerabilidad a crecidas e inundaciones**

### **2.1. Grado de vulnerabilidad de las microcuencas**

Para determinar la vulnerabilidad a crecidas de cada microcuenca se consideraron cinco criterios generales: a) parámetros de forma, b) parámetros de drenaje, c) pendiente, d) tiempo de concentración y e) grado de conflictividad en las *AP*. A los cuales se les asigna un porcentaje (cuya sumatoria es 100%), porcentaje asignado al considerar la importancia que se le asignan mayormente a cada criterio o parámetro en los diversos estudios (Pareta & Pareta, 2011; Saavedra, 2001; Fuentes, 2004; Zăvoianu, 1985; Horton, 1945). Si el criterio posee diferentes parámetros se subdividió el porcentaje asignado entre la cantidad de parámetros, de manera equitativa. Posteriormente el porcentaje asignado al parámetro se escala de acuerdo a la literatura, teniendo en cuenta los supuestos a vulnerabilidad a crecidas de cada parámetro, de manera que a mayor porcentaje en la escala mayor será su vulnerabilidad a crecidas (Cuadro 8). Por último, la sumatoria de los valores seleccionados en cada parámetro dará el porcentaje de vulnerabilidad de la microcuenca a las crecidas.

**Cuadro 8.** Interpretación, escala y valor de cada parámetro del grado de vulnerabilidad

Parámetro	*Interpretación	Escala	Valor de escala	Valor
<b>Criterio: PARÁMETROS DE FORMA</b>				<b>15%</b>
<i>Kc</i>		1,00 a 1,25= circular	4%	4%
		1,26 a 1,50= ovalada.	3%	
		1,50 a 1,75= oval-alargada	2%	
		> 1,75= alargada	1%	
<i>Rc</i>	La premisa es que cuencas que tienden a formas circulares, presentan una peligrosidad mayor a crecidas, mientras que por lo contrario, cuencas alargadas poseen menos posibilidad a ondas de crecidas continuas.	1 a 0,75= circular	4%	4%
		0,75 a 0,50= ovalada	3%	
		0,50 a 0,40 oval-alargada	2%	
		< 0,40 = alargada.	1%	
<i>Re</i>		> 0,85= circular	4%	4%
		0,85 a 0,70= ovalada	3%	
		0,70 a 0,50= oval-alargada	2%	
		< 0,5= alargada	1%	
<i>Ff</i>		1 a 0,60= circular	3%	3%
		0,60 a 0,35= ovalada	2%	
		<0,35 alargada	1%	
<b>Criterio: PARÁMETROS DE DRENAJE</b>				<b>15%</b>
<i>Or</i>	Valores altos suponen un mayor control estructural del relieve y mayor posibilidad de erosión, lo que sugiere una respuesta más rápida a precipitación, colecta de volúmenes mayores de agua, por consiguiente, tiempo de concentración menor, siendo así más vulnerable a crecidas.	1 a 2= bajo	1%	3%
		2 a 4= medio	2%	
		4 a 6= alto	3%	
<i>Fc</i>	Dado su relación con la permeabilidad, capacidad de infiltración y relieve de la cuenca, valores altos suponen una evacuación de las precipitaciones en menor tiempo, por tanto, mayor posibilidad de crecidas.	5= bajo	1%	3%
		15= medio	2%	
		20= alto	3%	
<i>Dd</i>	La premisa es que en zonas de alta “Dd” la escorrentía recorre la superficie rápidamente, rebajando el tiempo de concentración e incrementando los picos de crecida, al haber menor infiltración.	0,1 a 1,8= baja	1%	3%
		1,9 a 3,6 = moderada	2%	
		3,7 a 5,6= alta	3%	
<i>Rb</i>	Valores altos de “Rb” indican picos de respuesta temprana en el hidrograma, con un potencial a crecidas repentinas durante tormentas.	0 a 2= bajo	1%	3%
		2 a 4= moderado	2%	
		> 4= alto	3%	
<i>Dt</i>	Valores altos suponen una mala topografía del terreno, en consecuencia un mayor escurrimiento superficial, potenciando crecidas repentinas.	< 4= grueso	1%	3%
		4 a 8= intermedio	2%	
		>8= fino	3%	
<b>Criterio:</b>	Una mayor pendiente favorece la escorrentía superficial disminuye la infiltración de la precipitación, entonces a	0 a 2% = llano	2%	<b>30%</b>
		2 a 5%= suave	4%	

<i>S</i>	mayor pendiente, mayor posibilidad a crecidas.	5 a 10%= accidentada media	8%	
		10 a 15%= accidentado	15%	
		15 a 25%= fuertemente accidentado	20%	
		25 a 50%= Escarpado	25%	
		>50%= muy escarpado.	30%	
<b>Criterio:</b>	A mayor tiempo de concentración, supone una menor posibilidad de crecidas bruscas. Dado que el aporte de agua al cauce principal es más difuso.	>83,3= lento	3%	
<i>Tc</i>		41,6-83,2= moderada	6%	<b>10%</b>
		0-41,7= rápido	10%	
<b>Criterio:</b>	Supone que a mayor conflictividad, habrá una mayor escorrentía por efectos de una mayor impermeabilidad.	-1 a -0,5 = alta conflictividad	30%	
<i>GC</i>		-0,5 a 0 = moderadamente alta	23%	<b>30%</b>
		0 a 0,5 = moderada	15%	
		0,5 a 1= baja	8%	
<b>PRIORIZACION</b>	Entre más alto es el valor mayor vulnerabilidad a crecidas			<b>100%</b>

\*Pareta y Pareta, 2011; Saavedra, 2001; Fuentes, 2004; Zăvoianu, 1985

## 2.2. Zonas de mayor vulnerabilidad a inundaciones

Determinado la vulnerabilidad de las microcuencas se procede con la determinación de las zonas más propensas a inundaciones. Para lo cual se calculó el parámetro orientación y curvatura del terreno, de la siguiente manera:

### 2.2.1. Orientación

El cálculo de la orientación se hizo usando la herramienta “*aspect*” de ArcGis 10.1, al tener de insumo el MDT en formato raster. Tal cálculo supone una ventana de 3 por 3 celdas (correspondientes a los pixeles del raster del MDT, cada celda con un valor de elevación), para cada celda central se le calcula un valor de orientación mediante un algoritmo que incorpora los valores de las ocho celdas vecinas. Las celdas se identifican con letras, de la “a” a la “i”, siendo la “e” la celda para la cual se le calcula la orientación (*Ort*, Figura 10). Para lo cual se calcula una tasa de cambio en la dirección “x” (Ecuación 14) y en la dirección “y” (Ecuación 15), con base en estas tasas se determina la orientación de la celda “e” (Ecuación 16) y posteriormente se le asigna un valor de dirección de brújula (0 a 360°, Ecuación 17).

a	b	c
d	e	f
g	h	i

**Figura 10.** Ventana de distribución de letras por cada celda

$$\left[ \frac{dz}{dx} \right] = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8}$$

Ecuación 14

$$\left[ \frac{dz}{dy} \right] = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8}$$

Ecuación 15

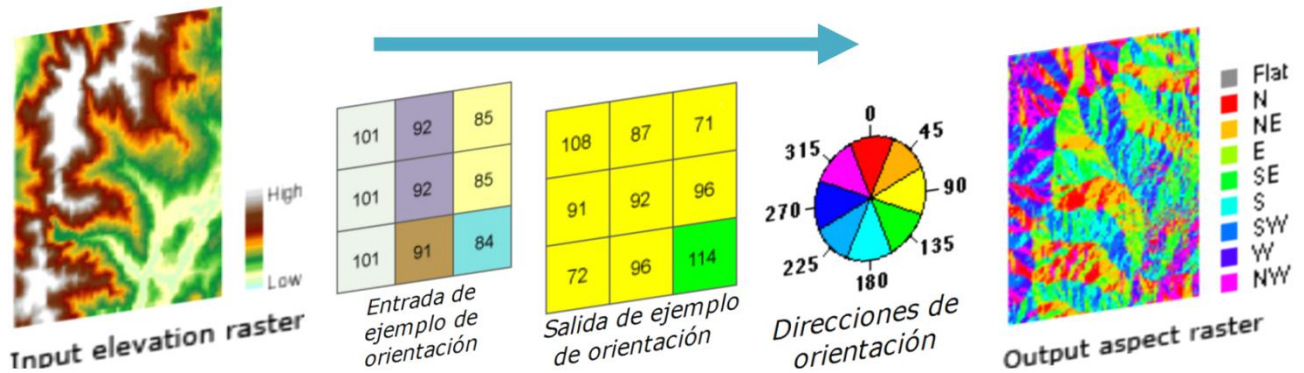
$$Ort = 57,29578 * \tan^{-1} 2 \left( \left[ \frac{dz}{dy} \right] - \left[ \frac{dz}{dx} \right] \right)$$

Ecuación 16

si  $Ort < 0$   $celda = 90.0 - Ort$ ; sino  $Ort > 90.0$   $celda = 360.0 - Ort + 90.0$ ; sino  $celda = 90.0 - Ort$

Ecuación 17

Para ejemplificar el funcionamiento de la herramienta se muestra el diagrama de la secuencia de pasos del algoritmo para obtener la orientación de cada celda (Figura 11).

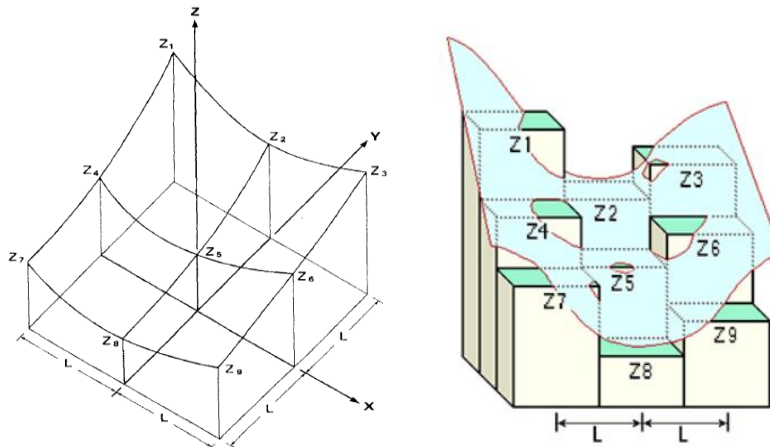


**Figura 11.** Pasos del algoritmo para calcular la orientación de la superficie

### 2.2.2. Curvatura

El cálculo del valor de curvatura de cada celda, se realizó con la herramienta “*curvature*” de ArcGis 10.1, el cual requiere de insumo el raster del MDT, dando como resultado la curvatura horizontal y vertical, además de una curvatura integrada de las dos anteriores. Esta última corresponde a la salida principal de la herramienta y es determinada a partir de un ajuste de la celda en estudio (Ecuación 18 y Ecuación 19), con sus vecinas circundantes (en una ventana de tres por tres, Figura 12, donde cada

celda posee un valor de elevación), resultando la salida la segunda derivada de la superficie, correspondiente a la curvatura (*Crv*; Ecuación 20).



**Figura 12.** Diagrama de enumeración de los valores de elevación de la ventana

Elaboración propia con datos del programa ArcGis 10.1, y Zevenbergen & Thorne, 1987

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

**Ecuación 18**

$$A = [(Z1 + Z3 + Z7 + Z9) / 4 - (Z2 + Z4 + Z6 + Z8) / 2 + Z5] / L^4$$

$$B = [(Z1 + Z3 - Z7 - Z9) / 4 - (Z2 - Z8) / 2] / L^3$$

$$C = [(-Z1 + Z3 - Z7 + Z9) / 4 + (Z4 - Z6) / 2] / L^3$$

$$D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / L^2$$

$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / L^2$$

$$F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4L^2$$

$$G = (-Z4 + Z6) / 2L$$

$$H = (Z2 - Z8) / 2L$$

$$I = Z5$$

**Ecuación 19**

$$Crv = -2(D + E) * 100$$

**Ecuación 20**

Tenido el mapa de curvatura y orientación se tienen dos principales premisas, de las cuales surge un supuesto para determinar las zonas con mayor vulnerabilidad:

Premisa 1. Celdas con valor de *Ort* indefinidos, es decir, igual a -1, corresponden a sitios planos, por tanto, un menor dinamismo de aguas pluviales y escorrentía. Por ende, más vulnerables a inundaciones.

Premisa 2. Celdas con valores de  $Crv$  positivos (convexas) tienden a dispersar el agua, mientras que valores negativos (cóncavas) tienden al acumulamiento de agua y celdas con valores cercanos a cero tienden a presentar un menor dinamismo de la escorrentía, por tanto, representan sitios más vulnerables a inundaciones.

Supuesto 1. Las celdas que coincidentes en  $Ort$  indefinida y  $Crv$  cercana a cero tienden a presentar sitios con un menor dinamismo de aguas superficiales, por tanto, representan sitios más vulnerables a inundaciones.

### **3. Objetivo 3. Ubicación de áreas potenciales de I.V. urbanas**

La asignación de área urbana se hace a partir del Censo Nacional de Población y Vivienda (2011), en el cual las áreas urbanas se delimitaron con base en criterios físicos y funcionales, tomando en cuenta elementos tales como: cuadrantes claramente definidos, calles, aceras, servicios urbanos (recolección de basura, alumbrado público) y actividades económicas como: industria, grandes comercios y servicios diversos. La delimitación geográfica se realizó a partir de los centros administrativos de cada cantón o distrito y se amplió de manera compacta en función de las características antes señaladas (INEC, 2016a). Además se considera la clasificación de grado de urbanización realizada por el INEC (2016a), donde se señala al distrito de Cot y Paraíso de Cartago como predominantemente urbano. También si tomamos en cuenta como indicador el tamaño demográfico de los asentamientos, muchos autores coinciden en que el límite inferior urbano es de 10 000 habitantes (Villavazo, Corona & García, 2002), considerando esto el distrito de Cot y Paraíso superan dicho límite, con 10 417 y 21 006 habitantes respectivamente (INEC, 2016b).

Las I.V. es el marco ecológico necesario para la sostenibilidad en los centros urbanos y periurbanos, en pocas palabras, es el sistema de sostenimiento de la vida natural en las ciudades (Benedict & McMahon, 2006). Siendo las áreas verdes y abiertas urbanas los lugares donde las I.V. (con todos sus procesos ecológicos y beneficios) toman principal contexto en el ambiente urbano y periurbanos (Gill et al., 2007; Lundy & Wade, 2011). Entendido de esta manera es relevante evaluar el estado de las I.V. presentes en los dos principales centros urbanos de la subcuenca (la comunidad de Cot y

Paraíso), para lo cual se procederá de dos maneras, una para las áreas verdes y otra para el arbolado urbano público.

### 3.1. Áreas Verdes (AV)

Para un mejor entendimiento se definirá AV urbana como lo indica Castro (2005), “aquel parche de suelo descubierto que permite el desarrollo de cualquier tipo de vegetación” y que estos sean de acceso público. El procedimiento para evaluar el estado de las áreas verdes se consideró como base la metodología propuesta en el trabajo de Castro (2005), quien propone los siguientes pasos:

1. La identificación de estas AV: se realizó en primer instancia mediante imágenes satelitales (Bing y Google EARTH), las áreas identificadas fueron digitalizadas a vectores poligonales mediante SIG. Los criterios para delimitar cada una de las áreas verdes son: parches continuos de vegetación (incluso vegetación herbácea), un cambio abrupto en la vegetación se considera como otro polígono diferente, igualmente se procede con la división provocada por otras infraestructuras como: calles, grandes, aceras edificios y elementos naturales como ríos.
2. Cuantificación Índice de Importancia de las Zonas Verdes (%IZV), la ecuación para ello es la siguiente (Ecuación 21):

$$\%IZV = \frac{(\sum_{i=1}^8 ViXi)}{0,56}$$

**Ecuación 21**

**Donde:** %IZV= índice de importancia de las zonas verdes;  $X_i$ = Calificación del área verde para la variable “i”;  $V_i$ = Valor fijo de variables “i”, y 0,56= denominador utilizado para expresarlo en porcentaje.

Para calcular el índice de %IZV, se asignó un valor fijo ( $V$ ), este “ $V$ ” se estableció considerando la importancia que a juicio del autor tenía la variable respectiva ( $i$ ) en la determinación del valor, de manera que entre mayor sea el “peso” de la variable “ $i$ ” en la decisión, mayor sería el valor absoluto de “ $V_i$ ”. Se trabajó con valores fijos, absolutos, comprendidos entre 0 y 5. Cada área verde se califica con base en una escala de 1 a 4 para cada variable (columna “ $X$ ”), según se observa en el Cuadro 9; este puntaje se multiplicó por el valor fijo correspondiente. Luego se sumaron todos los

productos obtenidos y el resultado dividido entre 0,56 da el %IZV. La Ecuación 21 es aplica a cada AV y se obtiene el %IZV para cada una.

**Cuadro 9.** Variables consideradas en el índice de %IZV

Variable	V	X	Detalle de la calificación	Justificación de las Variables
Tamaño del lote	5	1	20 a 525 m <sup>2</sup>	Se consideró que entre más grande el lote, mayor posibilidad de que se establezcan procesos naturales dinámicos y espontáneos y el área en cuestión se comporte como un parche natural.
		2	526 a 878 m <sup>2</sup>	
		3	879 a 2754 m <sup>2</sup>	
		4	>= 2754,1 m <sup>2</sup>	
Cobertura del Suelo	4	1	Fabáceas altas (gramalt)	Esta variable intenta describir la cobertura herbácea del suelo. Es importante porque puede jugar un papel importante en la regeneración de la vegetación espontánea. Además están relacionadas con la escorrentía e infiltración de las precipitaciones.
		2	Fabáceas y arbustos (gramyarb)	
		3	Fabáceas bajas (grambaj)	
		4	Césped y/o coberturas de hoja ancha herbáceas (cob)	
Estado del suelo	2	1	Alta presencia de escombros enterrados en los horizontes superficiales (escent)	Se intenta describir el estado de los horizontes superficiales del suelo, pues en muchas ocasiones estos lotes han sido altamente modificados por la adición de sustratos, materiales enterrados, etc. Lo que podría incurrir a una mayor impermeabilidad del suelo, por ende, más escorrentía.
		2	Presencia de residuos orgánicos enterrados (resorg)	
		3	Capas de suelo modificado (adicionados o removidos) (capmod)	
		4	Suelo sin modificación.(sin)	
Área de Copa	3	1	0 a 15 %	Esta variable intenta tomar en cuenta la intercepción de la precipitación por las copas y arquitectura del árbol, lo que supone que a mayor área de copa una menor escorrentía veloz y una mayor infiltración de la misma.
		2	15 a 25 %	
		3	25 a 50 %	
		4	> 50 %	

Tomado y modificado de Castro (2005)

### 3.2. Arbolado Urbano Público (AURP)

Para este estudio se entenderá como arbolado urbano público (AURP) a aquella vegetación leñosa con un diámetro a la altura del pecho (a 1,3 m del suelo, DAP) mayor o igual a 10 cm y arbustos con una altura superior a 2 m, ubicados en el espacio de uso público del ambiente urbano (aceras, parques, áreas verdes, orillas de calles, espacios de recreación, otros). Determinándose por cada

árbol censado, las variables mostradas en el Cuadro 10, sin embargo, en el caso de los arbustos solo se proyecta el área de su copa.

**Cuadro 10.** Procedimientos de toma de datos del AURP

<b>Variable</b>	<b>Procedimiento de toma de datos del AURP</b>
DAP	Se utiliza una cinta diamétrica graduada en centímetros (cm), bordeando el tronco a una altura 1,30 m perpendiculares al suelo.
Área de Copa ( <i>Ac</i> )	Se proyecta los ejes X y Y, con una cinta métrica.
Ubicación	Se ubican por cada individuo un punto en un GPS, teniendo sus coordenadas.
Código	Cada individuo censado en campo se codifica con una enumeración continua.

Con los datos recopilados del censo en el campo, se procedió con la proyección de la copa de cada individuo en un mapa. Lo anterior mediante los ejes “X” y “Y” tomados en campo, los cuales son promediados para obtener el diámetro del círculo que corresponderá al área de la copa, área que con herramienta de geoprocetamiento de un SIG y las coordenadas de cada árbol fueron proyectadas en un mapa. Permitiendo interpretar las coberturas de las copas, al suponer que en las áreas con mayor cobertura habrá una mayor intercepción de precipitaciones, por tanto, una disminución en la energía cinética de las precipitaciones sobre el suelo, por ende, menos velocidad de escorrentía superficial, así como una menor erosión del suelo circundante.

#### **4. Objetivo General. Determinación de zonas de I.V., para reducción del volumen de escorrentía y mitigación de la vulnerabilidad a inundaciones**

##### **4.1. Determinación de zonas para el desarrollo de IV**

Para determinar las zonas de desarrollo de *IV* se requirió de insumo los productos obtenidos en los pasos anteriores. Con los cuales se estableció una primera capa que visualiza en general las zonas potenciales para desarrollar *IV*, posteriormente se utilizó la técnica de álgebra de mapas para establecer otros escenarios más restrictivos respecto al área para el desarrollo de *IV*, o bien, escenarios que pueden funcionar como líneas con el fin de priorizar zonas por desarrollar *IV*. Para

establecer estos diversos escenarios se tuvieron en cuenta ciertos puntos generales como los siguientes:

1. Las cuencas hidrográficas son sistemas naturales y dinámicos, que funcionan como unidades de gestión donde lo que se haga en una zona de la cuenca repercutirá, en determinado tiempo, en el resto de ella (Ferrando, 2006). Por tanto, los procesos que ocurren al interior de las cuencas, sean naturales o potenciados por acción humana, deben ser controlados desde su inicio (es decir, desde el nacimiento de los cursos de agua hacia aguas abajo).
2. Condiciones de los patrones del paisaje (Woo y Park, 2016), a) parches de mayor tamaño reduce la escorrentía máxima, b) la composición compleja (heterogénea) de los parches reduce los picos de escorrentía, c) los patrones de los paisajes menos fragmentados y agrupados disminuyen los picos de escorrentía y d) los patrones altamente conectados reducen los picos de escurrimiento.
3. Una alta conflictividad en el uso de la tierra está asociada a una alta degradación ambiental (IGAC & Corpoica, 2002). Además un uso de la tierra más permeable presenta menos picos de escorrentía. Por tanto, a mayor conflictividad aumenta el peligro de picos de escorrentía e inundación.

Además se tuvo en consideración los siguientes dos supuestos:

1. Zonas con valores altos de G.V. suponen zonas donde el dinamismo de escorrentía es mayor, por tanto, una menor capacidad de infiltración, es decir, estas zonas van a aportar una mayor cantidad de agua a las zonas aguas abajo.
2. Zonas con valores cercanos a cero de Cr e indefinidos de Or suponen una mayor acumulación de aguas de escorrentía, al tratarse de sitios con relieve planos o cóncavos.

Considerando lo anterior se procedió con el procedimiento descrito en el Cuadro **12**, para lo cual se requirieron los insumos descritos en el Cuadro **11**:

**Cuadro 11.** Insumos requeridos para la determinación de zonas para el desarrollo de IV

<b>Mapa producto pasos anteriores</b>	<b>Justificación</b>	<b>Insumo requerido</b>
Pendientes > 15%	A partir de una inclinación de 12% los suelos bajo cultivos empiezan a requerir prácticas importantes para su conservación (Mintegui, Robredo, De Gonzalo, & Huelin, 2009). Por lo cual requieren de prácticas diversas, que impidan la erosión y disminución de fertilidad, productividad, entre otros, permitiendo un espacio para el desarrollo de IV.	Pend >15%.shp
IV urbanas presentes	Las AV y las copas del AURP suponen un aporte en la regulación del dinamismo de la escorrentía y agua pluvial del paisaje, las copas de los árboles mediante la intercepción y las AV tanto en la intercepción como en la infiltración de escorrentía superficial.	IVurbanas.shp
Uso actual de la tierra (cobertura boscosa, urbano y cultivos permanentes)	Los bosques juegan un rol muy importante en el ciclo hidrológico, interceptan las precipitaciones, aumentan la rugosidad del terreno, favorecen la infiltración, brinda estabilidad al suelo, e influye en el balance hídrico de la cuenca. Por tanto, reducen la escorrentía y aumenta la resiliencia del paisaje a eventos hidrometeorológicos (Calder, Hofer, Vermont, & Warren, 2007). Por su parte los cultivos permanentes tienen un rol semejante pero a menor escala.	Bosques.shp CultPerma.shp Urbano,shp
GV microcuencas	El GV incluye aspectos morfológicos y biofísicos de la cuenca, por lo tanto, permite comprender las características de la dinámica de la escorrentía superficial en la cuenca.	GV.shp
Zonas inundación	Zonas con valores cercanos a cero de Cr e indefinidos de Or suponen una menor dinamismo de aguas de escorrentía, al tratarse de sitios con relieve planos y homogéneos.	Zonas inundación.shp
Orden de la corriente (3, 4 y 5)	Los drenajes de los dos primeros órdenes no son considerados, en un sentido para maximizar la posibilidad de tratar únicamente con drenajes con cuerpos de agua perennes o intermedios y en otro sentido para establecer un escenario más realista (en sentido que la ley solo protege los drenajes perennes e intermedios).	Orden 3.shp Orden 4.shp Orden 5.shp

**Cuadro 12.** Procedimiento para la determinación de zonas para el desarrollo de IV

PASOS	Insumos	Procedimientos	Resultados
<b>PASO 1.</b> Zonas potenciales para el desarrollo de IV	Pend >15%.shp IVurbanas.shp Bosques.shp CultPerma.shp	Se funcionaron todas las capas (insumos), mediante herramientas de geoprocésamiento, de tal manera que se obtuvo una única capa integrada con los polígonos: IV urbanas, Criterio pendientes mayor a 15%, cobertura boscosa y cultivos permanentes. Dicha capa corresponde a las zonas potenciales en general para desarrollar IV.	ZonasIV.shp
<b>PASO 2.</b> Clasificación de los rangos del GV	GV.shp	<p>La capa “GV.shp”, se reclasifica en tres rangos, establecidos de la siguiente forma (Ecuación 22):</p> $\text{Intervalo GV} = \frac{\text{GV}_{\text{mayor}} - \text{GV}_{\text{menor}}}{3}$ <p style="text-align: right;"><b>Ecuación 22</b></p> <p><b>Donde:</b> GV<sub>mayor</sub> = microcuenca con el mayor valor de GV; GV<sub>menor</sub> = microcuenca con el menor valor de GV; 3= cantidad de rangos deseados.</p> <p>Obtenido el intervalo entre rangos, se establecieron los tres rangos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo: GV<sub>menor</sub> + intervalo</li> <li>• Medio: GV<sub>menor</sub> + (2 * intervalo)</li> <li>• Alto: GV<sub>menor</sub> + (3 * intervalo)</li> </ul> <p>Con los rangos definidos se reclasifica la capa, de tal manera que se obtuvo una única capa integrada con tres polígonos: Bajo, Medio y Alto.</p>	Rang_GV.shp
<b>PASO 3.</b> Uniformización de capas a formato raster	ZonasIV.shp Rang_GV.shp	Posteriormente se procedió con la conversión de las capas a formato raster, para hacer uso de la herramienta álgebra de mapas (calculadora raster). El valor de celda del raster corresponde a la columna que contenga a los polígonos de interés (para <i>ZonasIV.shp</i> = columna que contenga IV urbanas, Criterio pendientes mayor a 15%, cobertura boscosa y cultivos permanentes, y para <i>Rang_GV.shp</i> = columna que contenga Bajo, Medio y Alto).	ZonasIV.grid Rang_GV.grid
<b>PASO 4.</b> Escenarios previos	ZonasIV.grid Rang_GV.grid	Con las capas en formato raster se procedió al uso de álgebra de mapas, para establecer tres escenarios generales (pudiéndose considerar estos para restringir el área para IV o como segmentos de priorización). Para ello se utilizaron las siguientes sentencias de operadores booleanos y relacionales:	Escenario1_Prev.grid Escenario2_Prev.grid Escenario3_Prev.grid

---

Escenario 1 (GV bajo, medio y alto):

```
((("ZonasIV" == IVurbanas) | ("ZonasIV" ==  
criterio pendiente mayor a 15%) | ("ZonasIV"  
== cobertura boscosa) | ("ZonasIV" == cultivo  
permanente)) & ("Rang_GV" == bajo) |  
("Rang_GV" == medio) | ("Rang_GV" == alto)  
))
```

Escenario 2 (GV medio y alto):

```
((("ZonasIV" == IVurbanas) | ("ZonasIV" ==  
criterio pendiente mayor a 15%) | ("ZonasIV"  
== cobertura boscosa) | ("ZonasIV" == cultivo  
permanente)) & ("Rang_GV" == medio)  
| ("Rang_GV" == alto)))
```

Escenario 3 (GV alto):

```
((("ZonasIV" == IVurbanas) | ("ZonasIV" ==  
criterio pendiente mayor a 15%) | ("ZonasIV"  
== cobertura boscosa) | ("ZonasIV" == cultivo  
permanente)) & ("Rang_GV" == alto))
```

---

<b>PASO 5.</b> Conectores de parches	Orden 3.shp Orden 4.shp Orden 5.shp	La conexión de los parches no conectados se consideró a partir de las AP con zonas de amortiguamiento de 10 m a cada lado de las corrientes de orden tres y superiores.	Conectores.shp
<b>PASO 6.</b> Definir las IV nuevas para las zonas inundables.	ZonasInundables .shp	Recortar las zonas con mayor vulnerabilidad a inundaciones colindantes y ubicadas dentro de las áreas urbanas (uso urbano).	IVurb_new.shp
<b>PASO 7.</b> Integrar las IV con los escenarios previos	Escenario1_Prev .grid Escenario2_Prev .grid Escenario3_Prev .grid Conectores.shp IVurb_new.shp	Por último se fusionan la capa de conectores con cada escenario, obteniendo los escenarios definitivos con los parches conectados. Para su fusión fue necesario convertir los escenarios de formato raster (.grid) a formato ".shp", obtenidos estos se empleó herramientas de geoprocésamiento para la fusión de las capas.	Escenario1_Integ.sh p Escenario2_Integ.sh p Escenario3_Integ.sh p

---

## 4.2. Modelado hidrológico

Para corroborar la hipótesis propuesta en la investigación se elaboró un modelado hidrológico con el programa Iber 2.4.3, que requiere de los insumos descritos más adelante.

### 4.2.1. Datos de hidrodinámica

Con la entrada de datos de precipitaciones se obtiene un hidrograma generado a partir de un evento específico, o bien, el aporte de un solo valor del caudal ( $m^3/s$ ). Sin embargo, no se pudo optar por la primera opción, debido a que los registros de precipitaciones de las estaciones cercanas a la subcuenca no cuentan con registros con unidades más bajas que 24 horas y para esta metodología se hacen necesarios datos preferiblemente en milímetros por minuto, ya que lo que se quiere es simular los eventos extremos que usualmente se dan en periodos de tiempo cortos. Por lo tanto, los datos hidrológicos para la modelación se obtuvieron por medio del cálculo de la precipitación de diseño y caudal máximo.

La precipitación de diseño es definida como un patrón de precipitación definido para utilizar en el diseño de un sistema hidrológico. En casos donde los registros no permiten obtener las intensidades máximas, estas se pueden calcular con la metodología de Dick Peschke descrita en (Perú, 2017), que relaciona la duración de la precipitación con la precipitación máxima en 24 horas, mediante la Ecuación 23:

$$P_d = P_{24h} \left( \frac{d}{1440} \right)^{0,25}$$

*Ecuación 23.*

**Donde:**  $P_d$ = precipitación diseño (mm),  $d$ = duración en minutos (la cual se obtiene mediante el tiempo de concentración), y  $P_{24h}$ = precipitación máxima en 24 horas (mm)

Obtenido el valor de precipitación se calculó el caudal máximo mediante el método del número de curva (N) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, descrito en Villón (2002). El cual en resumen deriva de una serie de curvas que va de 1 a 100, donde 100 indica que toda la lluvia escurre, mientras que 1 indica una infiltración total. El SCS presenta una tabla para su determinación (Anexo 1), donde de acuerdo al uso de la tierra, práctica o tratamiento del suelo, condición hidrológica y grupo hidrológico del suelo es posible definir el N

para un determinado uso de la tierra bajo condición de humedad antecedente (CHA) II (supone una condición de humedad normal o neutra; Cuadro 13). Sin embargo, como lo deseable es simular eventos extremos se determinó la condición donde el suelo este saturado, es decir, la CHA-III (que supone una condición de humedad en el límite superior) ya que lo que se desea es simular eventos extremos, se debe simular la condición donde el suelo esté saturado, mediante la Ecuación 24:

$$N_{III} = \frac{23N_{II}}{10 + 0,13N_{II}}$$

*Ecuación 24*

**Cuadro 13.** Valores seleccionados para definir N y coeficiente de manning

Tipología	Uso de la tierra	Tratamientos o practicas	Condición Hidrológica	Clasificación hidrológica de los suelos	N(II)	Valores Manning
Bosque	bosque	N/A	buena	B	55	0,12
Urbano	camino	superficie firme	N/A	D	92	0,02
Agro/cultivos	cultivo	curvas de nivel	pobre	B	79	0,04
Cult-perm	bosque	N/A	regular	B	60	0,07
IV-urbano	bosque	N/A	regular	B	60	0,1
IV-agrícola	patios	N/A	N/A	A	59	0,75
Rio	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,25

Definido el N para cada polígono de uso de la tierra, se realizó una media ponderada del N de cada polígono de uso de la tierra por cada microcuenca, a manera de obtener un único valor de N representativo para cada microcuenca. Posteriormente se determinó el gasto unitario (m<sup>3</sup>/seg/mm/km<sup>2</sup>) en función del Tc, para cada microcuenca, utilizando la tabla presentada por el SCS (Anexo 2) y elaborada con base en una serie de estudios sobre las intensidades, duración y cantidades de lluvia. Tenido este se calculó la escorrentía con la Ecuación 25, presentada en la metodología de Villón (2004):

$$Q = \frac{[N(P + 50,8) - 5080]^2}{N[N(P - 203,2) + 20320]}$$

**Donde:** Q= escorrentía (mm), P= precipitación (mm), y N= número de curva de escorrentía para la condición de humedad (en nuestro caso se utiliza la CHA-III).

Por último, se calculó el caudal máximo ( $Q_{max}$ ), requerido para el modelado, multiplicando el gasto unitario ( $q$ ), escorrentía ( $Q$ ) y el área de la cuenca ( $A$ , en  $km^2$ ; Ecuación 26):

$$Q_{max} = q \cdot Q \cdot A$$

#### **4.2.2. Polígonos de uso de la tierra (para determinar la rugosidad de los polígonos en las secciones de interés)**

La rugosidad es determinada mediante el coeficiente de rugosidad de Manning descrito en Chow (1994), el cual *grosso modo* representa una estimación de la resistencia de la superficie al flujo de agua, utilizando la tabla presentada por Chow (1994), al emplear como guía el tipo de canal y descripción y seleccionando los valores bajo el rango “normal”, al establecer un valor de rugosidad para cada uso de la tierra.

#### **4.2.3. MED (para interpretar la topografía del terreno)**

El MED fue obtenido previamente mediante las curvas de nivel 1:10 000, de las cuales se generó un archivo en formato raster. Tal archivo fue reformateado a formato “.txt” mediante la herramienta ASCII de ArcGis 10.1, debido a que el programa Iber requiere tal formato para poder modelar.

Con ello se obtuvo el  $N_{II}$  y  $N_{III}$ , la precipitación de diseño, gasto unitario, escorrentía y caudal máximo, por cada una de las microcuencas y por cada escenario de intensidad de zonificación de I.V. Además se calculó la diferencia absoluta y porcentual entre cada escenario respecto al escenario “base”, para generar una idea del aporte de las I.V. en la hidrología superficial de las microcuencas y de la subcuenca en general. Pese a ello solo se modelaron en el programa Iber las microcuencas

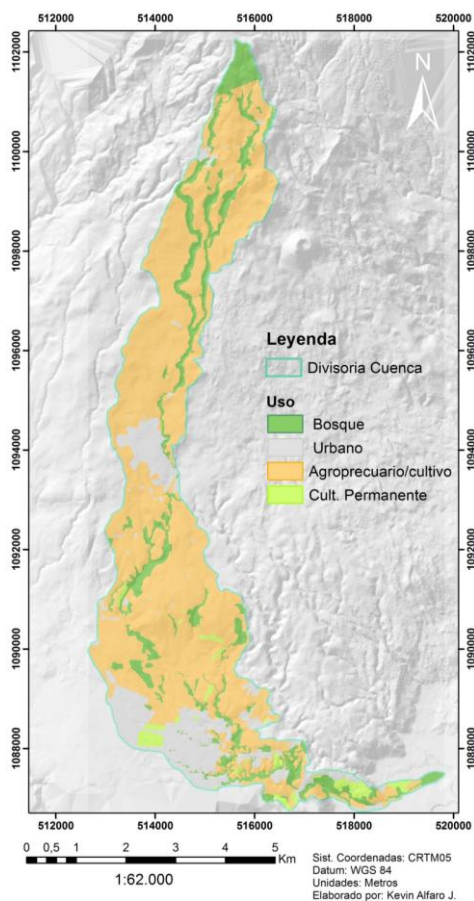
que han presentado anteriores eventos de inundaciones de acuerdo al comunicado oral de Sergio Sánchez Castillo de la CNE, además correspondieron con los sitios más vulnerables a inundaciones, según la metodología planteada en el presente estudio. Correspondiendo a la microcuenca 11 y 12 que comprenden la ciudad de Paraíso y las “microcuenca 0” que corresponde a la salida de la subcuenca desde la Catarata Los Novios hasta el desemboque con el río Reventazón. Esta última, realmente, integra los valores de hidrodinámica de la subcuenca del río Páez, sin embargo, para el modelado solamente se visualiza esta última sección de la subcuenca (antes señalada, microcuenca 0), debido a que esta sección se ha definido como alta vulnerabilidad, también para minimizar el consumo de procesamiento del programa (ya que el mismo está diseñado para modelar secciones pequeñas-puntuales, siendo la subcuenca un área muy grande que demanda mucho capacidad de procesamiento del ordenador).

## **X. RESULTADO Y DISCUSIÓN**

### **1. Objetivo 1. Caracterización morfométrica-biofísica**

De acuerdo con la fotointerpretación y visitas de campos se digitalizó el uso actual de la tierra, dominando el uso definido como *agropecuario/cultivos*, representando un 68% de la subcuenca, abarcando las tierras utilizadas en cultivo de hortalizas, pastizales en general y demás cultivos

anuales. De manera semejante Ramírez et al. (2008) determinaron que la subcuenca del río Reventado (vecina del Páez) al 2004 poseía un 72.1% de la subcuenca bajo cultivos, por lo tanto, es correspondido que en la zona hay un dominio de esta actividad. Siguiendo el uso de la tierra *bosque* y *urbano* representaron un 15% y 14%, respectivamente, el primero ubicado principalmente en AP de ríos con pendientes fuertes (que dificultan otros usos) y el segundo concentrándose en parte media y baja de la subcuenca, respectivamente en las comunidad de Cot y Paraíso. Por último, se ubica el uso de la tierra definido como *cultivo permanente* el cual corresponde a las tierras usadas en café, cultivos permanentes, sistemas combinados con árboles, arbustos de porte bajo y otros semejantes, los cuales representaron tan solo el 3% de la subcuenca (Figura 13 y Cuadro 14).



**Figura 13.** Uso actual de la tierra de la subcuenca río Páez

La morfometría de la subcuenca en general muestra, por un lado, valores de forma que reflejan una cuenca alargada, por lo tanto, en lo que a este parámetro se refiere la subcuenca posee menos posibilidad a ondas de crecidas continuas ya que las respuestas de regulación de las concentraciones de escorrentías superficiales van a ser más difusas respecto a las cuencas de formas tendientes a la circularidad (Gaspari et al., 2012; González, 2004). Por otro lado, los valores de los parámetros de drenaje fueron en general menos alentadores respecto a la vulnerabilidad a inundaciones. Todos

**Cuadro 14.** Área y porcentaje de cada uso de la tierra definido en la subcuenca del río Páez

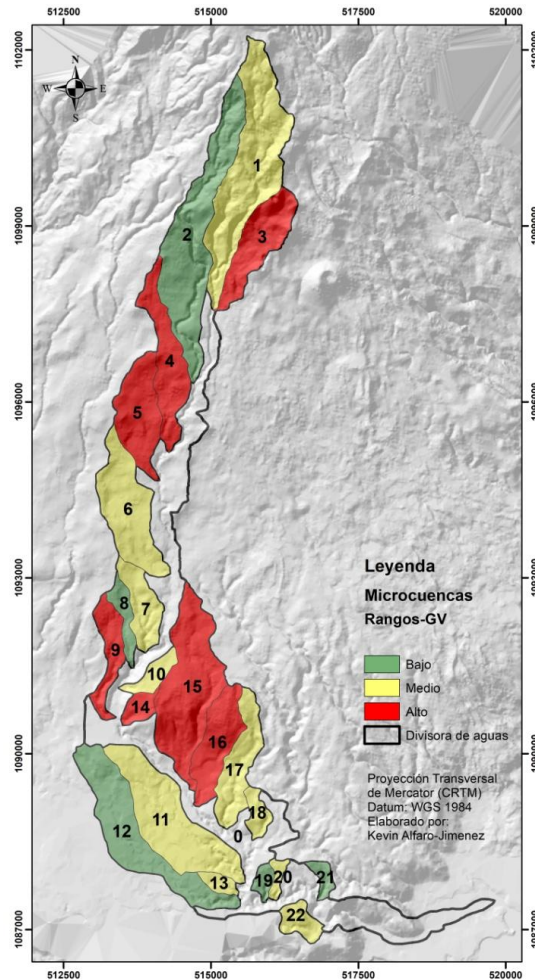
Uso Actual	Área	
	Km2	%
Urbano	3,97	14%
Cultivo Permanente	0,71	3%
Agropecuario/cultivo	19,6	68%
Bosque	4,35	15%
<b>Total</b>	<b>28,39</b>	<b>100%</b>

indican una respuesta más temprana en el hidrograma, reflejado en una evacuación del escurrimiento superficial en un menor tiempo, aumentando la vulnerabilidad a crecidas repentinas frente a tormentas (Ahmad et al., 2012; Gaspari et al., 2012; Shehal et al., 2013). Refiriéndose a la pendiente los valores obtenidos fueron 22% y 9%, respectivamente para el criterio de Alvord y el de compensación de áreas, indicando que es importante a tener en cuenta este parámetro, no obstante, no parece ser un parámetro crítico en la vulnerabilidad a inundaciones a nivel de subcuenca. El  $T_c$  se considera como lento, y el índice de  $GC$  da un valor negativo (-0,13) reflejando un dominio de zonas con usos de la tierra que no corresponden a cobertura boscosa, ni coberturas más favorables (como cultivos permanentes), indicando una mayor afectación del bosque ribereño (Danza & Sanabria 2008), provocando una mayor fragmentación del ecosistema y dificultando la capacidad para brindar servicios ecosistémicos de regulación (además de otros). Además esta alta conflictividad de uso de la tierra, potencializa la impermeabilización de las  $AP$  de los cauces (zonas de amortiguamiento), correspondiendo a una mayor vulnerabilidad a crecidas de los cauces e inundaciones en las zonas aledañas. Todos los anteriores parámetros reflejan un  $GV$  medio (obtenido 53 puntos de 100) a nivel de subcuenca (Cuadro 15).

Un análisis más detallado de la subcuenca, mediante el análisis de los valores morfométricos-biofísico de las 22 microcuencas delimitadas y estas en relación con los valores promedios ponderados por cuenca alta (microcuencas 1, 2, 3, 4 y 5), media (microcuencas 6, 7, 8, 9, 10, 14 y 15) y baja (microcuencas 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22), a su vez, al promedio ponderado de la subcuenca en general, se logra una mejor comprensión del comportamiento de la escorrentía sobre el paisaje y de la vulnerabilidad a crecida e inundaciones. Para ello primero abarcarán los parámetros de forma, en segundo lugar los parámetros de drenajes,  $S$ ,  $T_c$  y  $GC$ , respectivamente, para finalizar en el  $GV$  (Cuadro 15, Cuadro 16, y Figura 14).

**Cuadro 15.** Parámetros morfométricos-biofísico subcuenca río Páez y promedios subcuenca, sección alta, media y baja

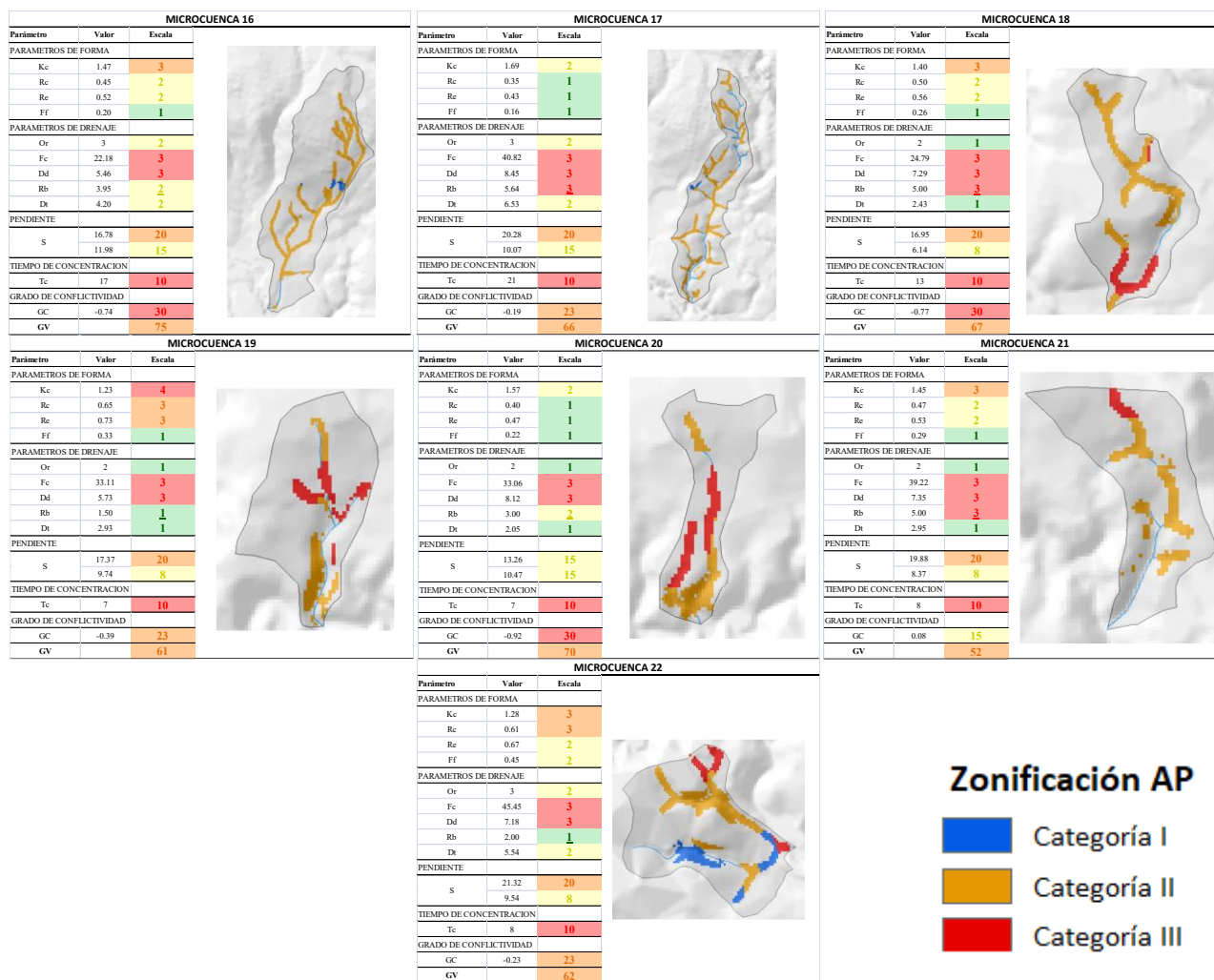
Parámetro	SUBCENCA RIO PAEZ		PROMEDIO PONDERADO							
			Subcuenca		Cuenca Alta		Cuenca Media		Cuenca Baja	
	Valor	Escala	Valor	Escala	Valor	Escala	Valor	Escala	Valor	Escala
<b>PARAMETROS DE FORMA</b>										
Kc	2.49	1	1.68	2	1.82	1	1.58	2	1.59	2
Re	0.16	1	0.37	1	0.31	1	0.4	1	0.41	2
Re	0.39	1	0.45	1	0.4	1	0.48	1	0.49	1
Ff	0.12	1	0.16	1	0.13	1	0.18	1	0.19	1
<b>PARAMETROS DE DRENAJE</b>										
Or	5	3	4	2	4	2	3	2	3	2
Fc	22.54	3	25.48	3	28.76	3	25.03	3	21.8	3
Dd	6.13	3	6.38	3	6.53	3	6.56	3	6.05	3
Rb	4.13	3	2.92	2	2.9	2	2.65	2	3.16	2
Dt	138.23	3	5.18	2	6.33	3	5.05	2	3.87	2
<b>PENDIENTE</b>										
	22	20	21.18	20	30.42	25	16.98	20	13.16	15
S	9	8	12.13	15	18	20	10.43	10	6.24	10
<b>TIEMPO DE CONCENTRACION</b>										
Tc	128	3	26	10	25	10	21	10	32	10
<b>GRADO DE CONFLICTIVIDAD</b>										
GC	-0.13	23	-0.4	23	-0.38	23	-0.61	30	-0.54	30
GV		53		66		67		69		63



**Figura 14.** Rangos de GV por microcuenca de la subcuenca río Páez

**Cuadro 16. Parámetros morfométricos-biofísico por microcuenca de la subcuenca río Páez**

MICROCUENCA 1			MICROCUENCA 2			MICROCUENCA 3		
Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala
PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA		
Kc	1.83	1	Kc	2.02	1	Kc	1.51	2
Re	0.29	1	Re	0.24	1	Re	0.44	2
Rc	0.39	1	Re	0.34	1	Re	0.50	2
Ff	0.13	1	Ff	0.10	1	Ff	0.20	1
PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE		
Or	4	2	Or	5	3	Or	3	2
Fc	36.43	3	Fc	22.42	3	Fc	34.13	3
Dd	7.50	3	Dd	5.15	3	Dd	8.28	3
Rb	3.68	2	Rb	3.04	2	Rb	1.88	1
Dt	9.17	3	Dt	5.04	2	Dt	6.58	2
PENDIENTE			PENDIENTE			PENDIENTE		
S	38.58	25	S	31.36	25	S	27.94	25
S	25.76	25	S	13.70	15	S	14.41	15
TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION		
Tc	24	10	Tc	35	10	Tc	18	10
GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD		
GC	0.22	15	GC	0.44	15	GC	-0.88	30
GV		67	GV		57	GV		73
MICROCUENCA 4			MICROCUENCA 5			MICROCUENCA 6		
Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala
PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA		
Kc	2.01	1	Kc	1.42	3	Kc	1.50	3
Re	0.24	1	Re	0.49	2	Re	0.44	2
Rc	0.34	1	Re	0.55	2	Re	0.51	2
Ff	0.10	1	Ff	0.21	1	Ff	0.19	1
PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE		
Or	3	2	Or	4	2	Or	4	2
Fc	26.36	3	Fc	22.30	3	Fc	31.65	3
Dd	6.15	3	Dd	6.14	3	Dd	7.30	3
Rb	1.99	1	Rb	2.55	2	Rb	2.18	2
Dt	3.91	1	Dt	4.67	2	Dt	7.22	2
PENDIENTE			PENDIENTE			PENDIENTE		
S	20.65	20	S	20.77	20	S	15.70	20
S	15.05	20	S	15.77	20	S	9.10	8
TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION		
Tc	22	10	Tc	16	10	Tc	21	10
GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD		
GC	-0.85	30	GC	-0.90	30	GC	-0.92	30
GV		74	GV		80	GV		68
MICROCUENCA 7			MICROCUENCA 8			MICROCUENCA 9		
Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala
PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA		
Kc	1.43	3	Kc	1.87	1	Kc	1.93	1
Re	0.48	2	Re	0.28	1	Re	0.27	1
Rc	0.54	2	Re	0.37	1	Re	0.36	1
Ff	0.22	1	Ff	0.11	1	Ff	0.10	1
PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE		
Or	3	2	Or	2	1	Or	3	2
Fc	21.67	3	Fc	15.73	3	Fc	41.81	3
Dd	6.29	3	Dd	6.86	3	Dd	8.43	3
Rb	3.17	2	Rb	1.50	1	Rb	4.64	3
Dt	3.41	1	Dt	2.29	1	Dt	4.60	2
PENDIENTE			PENDIENTE			PENDIENTE		
S	20.15	20	S	16.25	20	S	18.71	20
S	10.61	15	S	9.70	8	S	10.28	15
TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION		
Tc	13	10	Tc	14	10	Tc	19	10
GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD		
GC	-0.15	23	GC	-0.31	23	GC	-0.62	30
GV		67	GV		54	GV		72
MICROCUENCA 10			MICROCUENCA 11			MICROCUENCA 12		
Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala
PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA		
Kc	1.48	3	Kc	1.47	3	Kc	1.88	1
Re	0.45	2	Re	0.45	2	Re	0.28	1
Rc	0.52	2	Re	0.52	2	Re	0.37	1
Ff	0.20	1	Ff	0.19	1	Ff	0.12	1
PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE		
Or	2	1	Or	4	2	Or	3	2
Fc	17.43	3	Fc	15.84	3	Fc	10.17	2
Dd	5.71	3	Dd	5.59	3	Dd	5.06	3
Rb	1.50	1	Rb	2.20	2	Rb	2.63	2
Dt	1.77	1	Dt	4.34	2	Dt	2.07	1
PENDIENTE			PENDIENTE			PENDIENTE		
S	12.87	15	S	10.05	15	S	8.68	8
S	12.29	15	S	3.51	4	S	3.07	4
TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION		
Tc	19	10	Tc	40	10	Tc	50	6
GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD		
GC	-0.43	23	GC	-0.55	30	GC	-0.64	30
GV		65	GV		64	GV		54
MICROCUENCA 13			MICROCUENCA 14			MICROCUENCA 15		
Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala	Parámetro	Valor	Escala
PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA			PARAMETROS DE FORMA		
Kc	1.25	4	Kc	1.33	3	Kc	1.60	2
Re	0.63	3	Re	0.56	3	Re	0.38	1
Rc	0.70	3	Re	0.62	2	Re	0.46	1
Ff	0.27	1	Ff	0.26	1	Ff	0.18	1
PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE			PARAMETROS DE DRENAJE		
Or	2	1	Or	2	1	Or	4	2
Fc	35.61	3	Fc	12.87	2	Fc	20.81	3
Dd	6.87	3	Dd	4.86	3	Dd	5.90	3
Rb	2.00	1	Rb	2.00	1	Rb	2.69	2
Dt	3.28	1	Dt	1.31	1	Dt	5.42	2
PENDIENTE			PENDIENTE			PENDIENTE		
S	10.34	15	S	21.28	20	S	16.65	20
S	6.54	8	S	20.76	20	S	10.08	15
TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION			TIEMPO DE CONCENTRACION		
Tc	8	10	Tc	6	10	Tc	29	10
GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD			GRADO DE CONFLICTIVIDAD		
GC	-0.88	30	GC	-0.92	30	GC	-0.58	30
GV		68	GV		77	GV		72



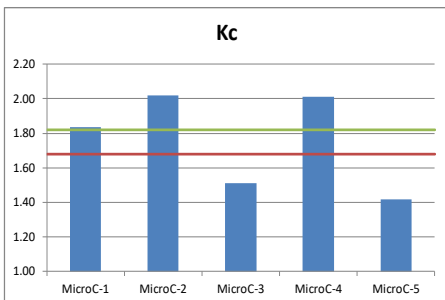
Los resultados obtenidos en los parámetros de forma, de los cuales se han considerado cuatro patrones de forma, a saber:  $Kc$ ,  $Rc$ ,  $Re$  y  $Ff$ , en la parte alta de la subcuenca el promedio ponderado de las microcuencas que la integran (microcuencas 1, 2, 3, 4 y 5) indica una forma alargada en todos los parámetros e inclusive presenta valores que indican un mayor alargamiento respecto al valor de la media de la subcuenca. Detallando en la parte alta, las microcuencas 5 y 3 son las que presentan formas menos alargadas, forma ovalada y ovalada-alargada respectivamente. Lo que sugiere que la parte alta de la subcuenca no presenta una vulnerabilidad importante a crecidas continuas, sin embargo, se debe prestar atención a las microcuencas 5 y 3, por su forma tendiente a la circularidad, aumentando la posibilidad de crecidas continuas (Figura 15).

En la parte media de la subcuenca el promedio ponderado de las microcuencas que la integran (microcuencas 6, 7, 8, 9, 10, 14 y 15) indica una forma alargada (pero menos que la parte alta), en todos los parámetros a excepción del  $Kc$  que indica una forma ovalada alargada (valor 1,58). A

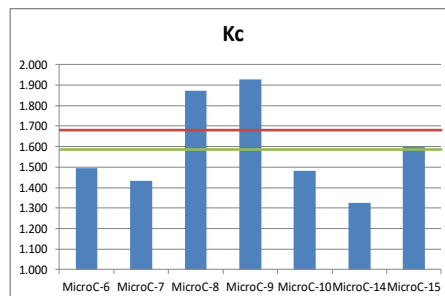
diferencia de la parte alta, las microcuencas de la parte media obtuvieron valores tendientes a formas menos alargadas, que el valor de la media de la subcuenca. Por lo tanto, sus cauces estarán más propensos a crecidas continuas, debido a que la escorrentía del paisaje tenderá a concentrarse en tiempos semejantes en los cauces, es decir un gran volumen de agua al mismo tiempo. Las microcuencas más propensas a este efecto en la parte media son 14, 7, 10 y 6 respectivamente (Figura 14).

Para la parte baja (integrada por las microcuencas 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22) se muestran valores promedios de forma que indican una cuenca ovalada en dos de los parámetros ( $Kc$  y  $Rc$ ) y alargada en los otros dos ( $Re$  y  $Ff$ ), además los valores promedios de esta sección, en todos los parámetros, indican una forma más circular que la media de la subcuenca. Entonces respecto a las secciones de la subcuenca, la parte baja representa una mayor posibilidad a ondas de crecidas, según los parámetros de forma y en ella principalmente las microcuencas 19, 13, 22, 18 y 21, en tal orden (Figura 15).

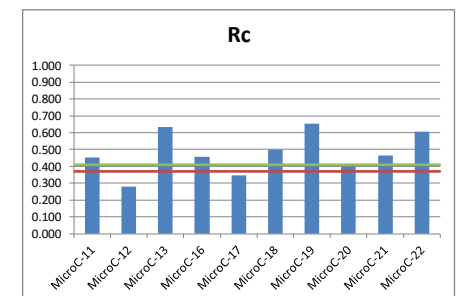
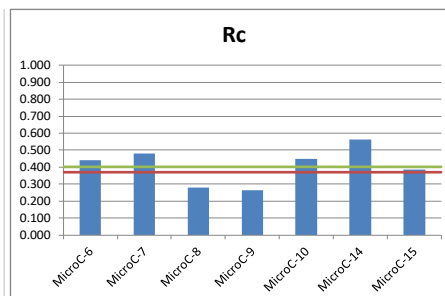
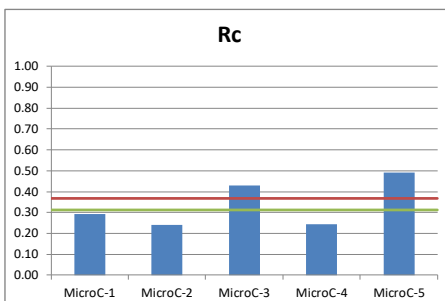
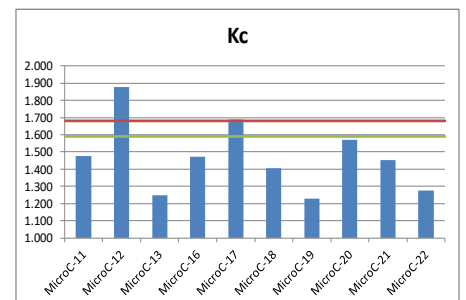
Sección alta de la subcuenca río Páez

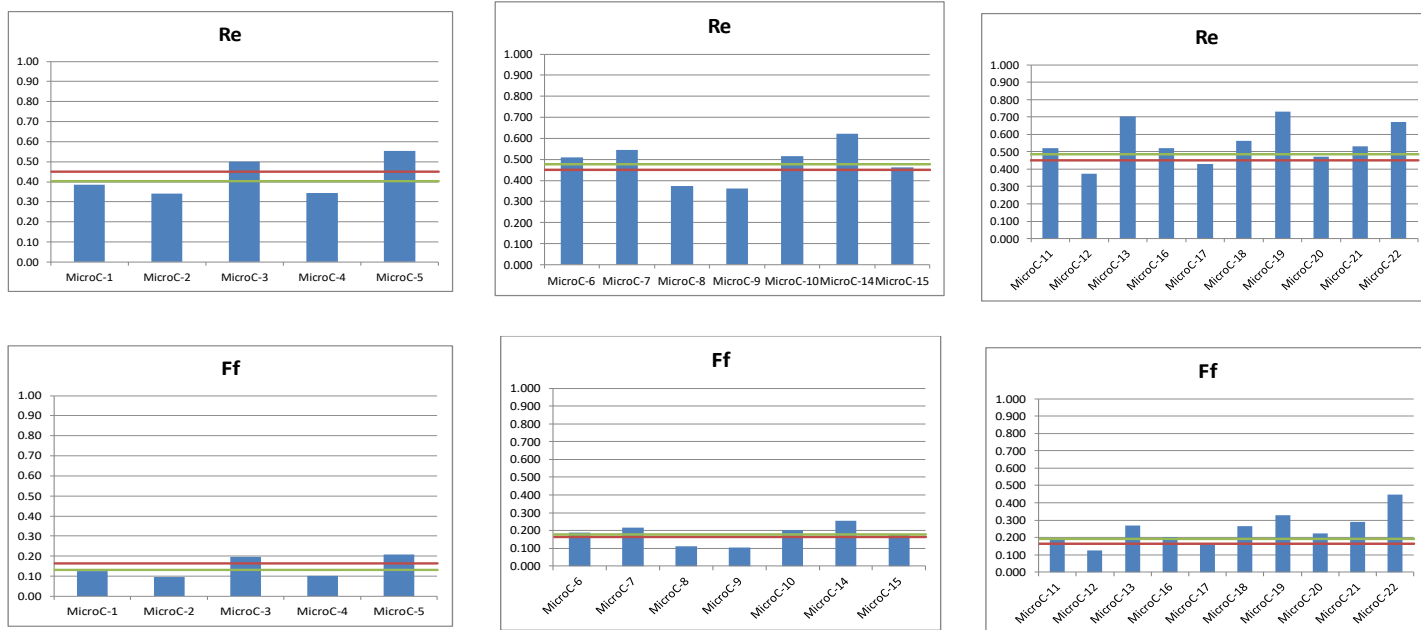


Sección media de la subcuenca río Páez



Sección baja de la subcuenca río Páez





**Figura 15.** Parámetros morfométricos de forma por microcuena, agrupados en cuenca alta, media y baja. Línea roja es el promedio ponderado de la subcuena en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuena.

Para la descripción de los parámetros de drenaje, se han considerado cinco: *Or*, *Fc*, *Dd*, *Rb* y *Dt* y todos ellos relacionados con la respuesta a las precipitaciones y escorrentías del paisaje (Pareta & Pareta, 2011; Saavedra, 2001; Fuentes, 2004; Zăvoianu, 1985). Se tiene que en la parte alta los valores mostrados por los parámetros son poco favorables respecto a la vulnerabilidad a crecidas, reflejándose con tres parámetros de drenaje en rojo (*Fc*, *Dd* y *Dt*) y dos en amarillo (*Or* y *Rb*). De hecho la única microcuena que presenta valores de drenaje más alentadores es la microcuena 4, con dos valores en verde (*Rb* y *Dt*), uno en amarillo (*Or*) y dos en rojo (*Fc* y *Dd*), además de permanecer siempre por debajo en los parámetros respecto a la media de la subcuena y la media de la parte alta (a excepción del parámetro de *Fc* con 26,36). Al contrario la microcuena 1 es la que presenta valores menos alentadores y se haya por encima de las medias en todos los parámetros (a excepción de *Or* con valores igual a la media, 4; Cuadro 15 y Cuadro 16). Lo que indica que la parte alta de la cuenca posee una estructura de drenaje compleja, por lo tanto, una respuesta más rápida a drenar el agua de escorrentía, pero así también un mayor volumen de escorrentía en el cauce en instantes menores, aumentando la posibilidad a crecidas. También estos valores altos en los parámetros de drenaje sugieren que la precipitación no se está infiltrando en el paisaje, debido a una cercanía mayor a algún drenaje (gracias a una red de drenaje más amplia; Pareta & Pareta, 2011; Saavedra, 2001; Fuentes, 2004; Zăvoianu, 1985; Figura 1).

La parte media de la subcuenca muestra valores de drenaje más positivos respecto a la parte alta. En esta sección (media), las microcuencas con una red de drenaje más compleja son la 9 y 6 respectivamente, mientras que las microcuencas 14, 10 y 8, respectivamente, presentan una estructura menos compleja, sugiriendo una mayor posibilidad de que la escorrentía se infiltre en el paisaje, debido a un mayor recorrido de la escorrentía en ladera, para depositarse en un cauce. Lo que a su vez favorece a un menor tiempo de concentración y con probabilidad a depósitos de escorrentía en el cauce con tiempos más difusos y volúmenes más variables en los cauces, minimizando la posibilidad a crecidas espontáneas.

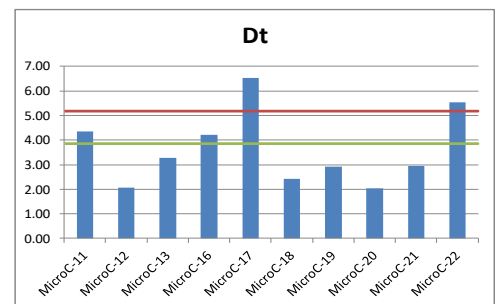
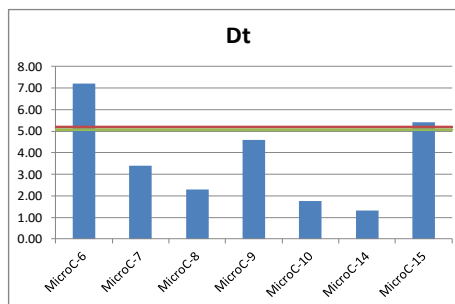
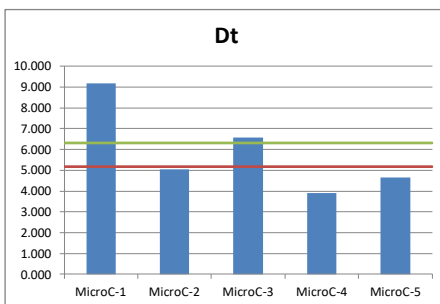
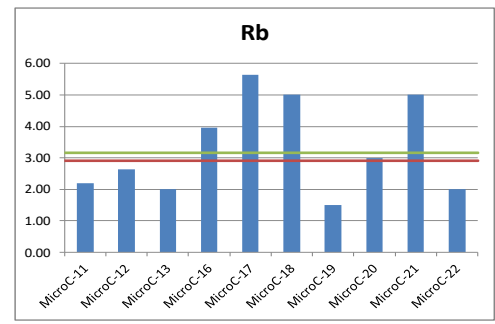
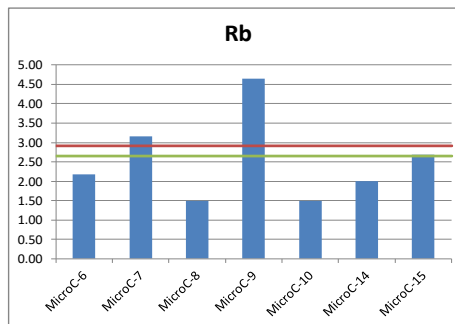
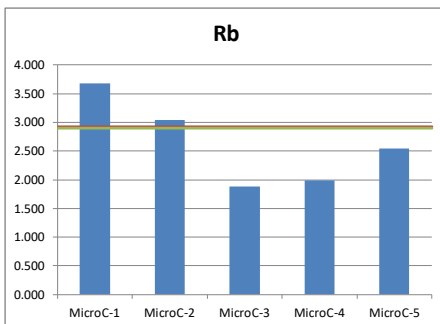
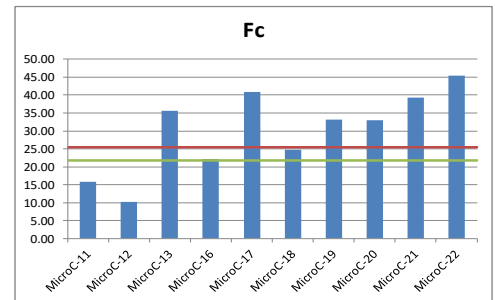
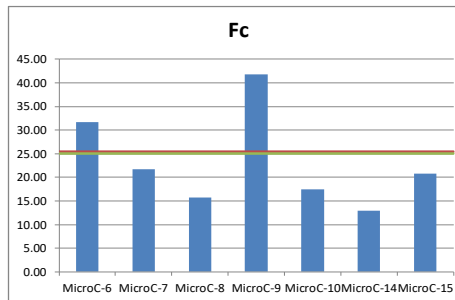
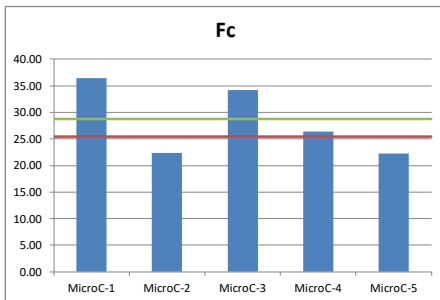
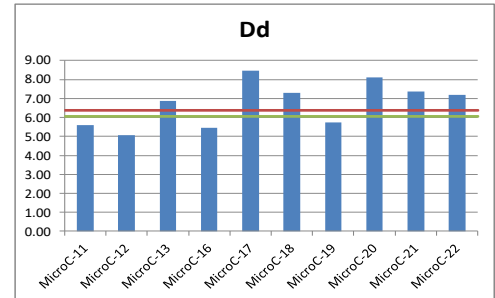
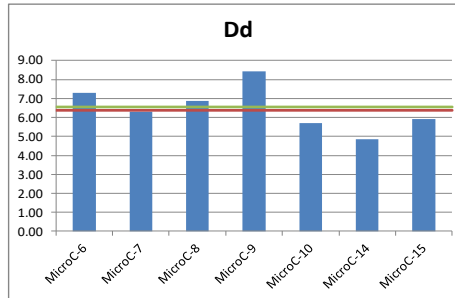
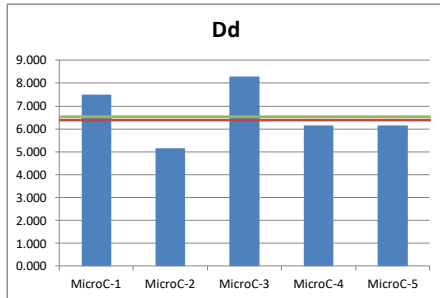
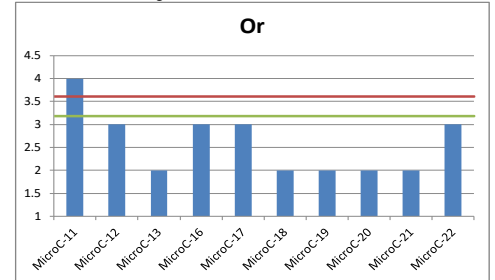
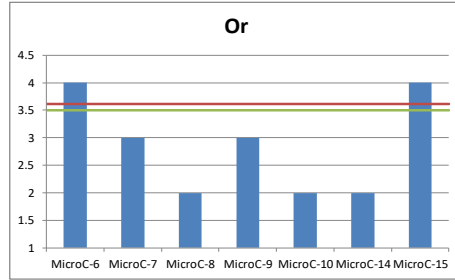
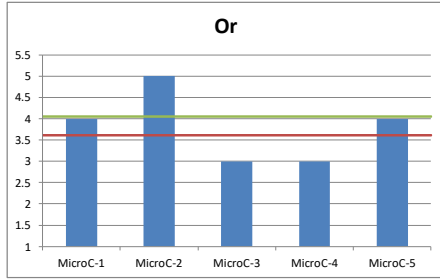
La sección baja de la subcuenca muestra valores de drenaje más bajos respecto a la parte alta y media (a excepción del *Rb*). Sin embargo, los valores siguen ubicándose en rangos altos de drenaje, en especial en las microcuencas 17, 21 y 18, respectivamente, no así en las microcuencas 19, 13, 12, 22 y 11, respectivamente. Pese a ello, la sección baja de la subcuenca presenta una menor posibilidad de crecidas y mayor posibilidad que la precipitación se infiltre en el paisaje, generando menos volúmenes de escorrentía que en consecuencia se depositan en el cauce en tiempos más difusos y mayores, según los valores de parámetros de drenaje.

A nivel general, respecto a los parámetros de drenaje, se tiene un gradiente más favorable (en cuanto a mayor posibilidad de infiltración de escorrentía en el paisaje y menores posibilidades de crecidas espontáneas) de la sección alta de la subcuenca a la sección baja de la misma. Un aspecto que relaciona tal efecto es el relieve de cada microcuenca ya que relieves montañosos están relacionados a valores altos de parámetros de drenaje (Méndez, 2016; Ayala, Páez & Araque, 2007; Zavoianu, 1985), por tal motivo la sección alta posee valores más altos en los parámetros. También se debe tener claro que la red de drenaje depende del nivel de escala con la que se esté trabajando, en especial de las curvas de nivel, que para el caso en estudio se utilizó una escala 1:10 000, a diferencia de la escala 1:50 000 que usualmente se ha empleado en los estudios de cuencas. Por lo tanto, existe la posibilidad que los valores altos obtenidos en los parámetros de drenaje se vean influenciados por la diferencia de escala entre los valores de referencia de los estudios y los obtenidos en el presente estudio, teniéndose una red más compleja a escalas más precisas. De igual forma no necesariamente un drenaje trazado con base en las curvas de nivel indique un cauce real, no obstante, si representa un drenaje, es decir, un punto donde la escorrentía tenderá a fluir para evacuar el agua del paisaje hasta un cauce.

**Sección alta de la subcuenca río Páez**

**Sección media de la subcuenca río Páez**

**Sección baja de la subcuenca río Páez**



**Figura 16.** Parámetros morfométricos de drenaje por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja. Línea roja es el promedio ponderado de la subcuenca en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuenca.

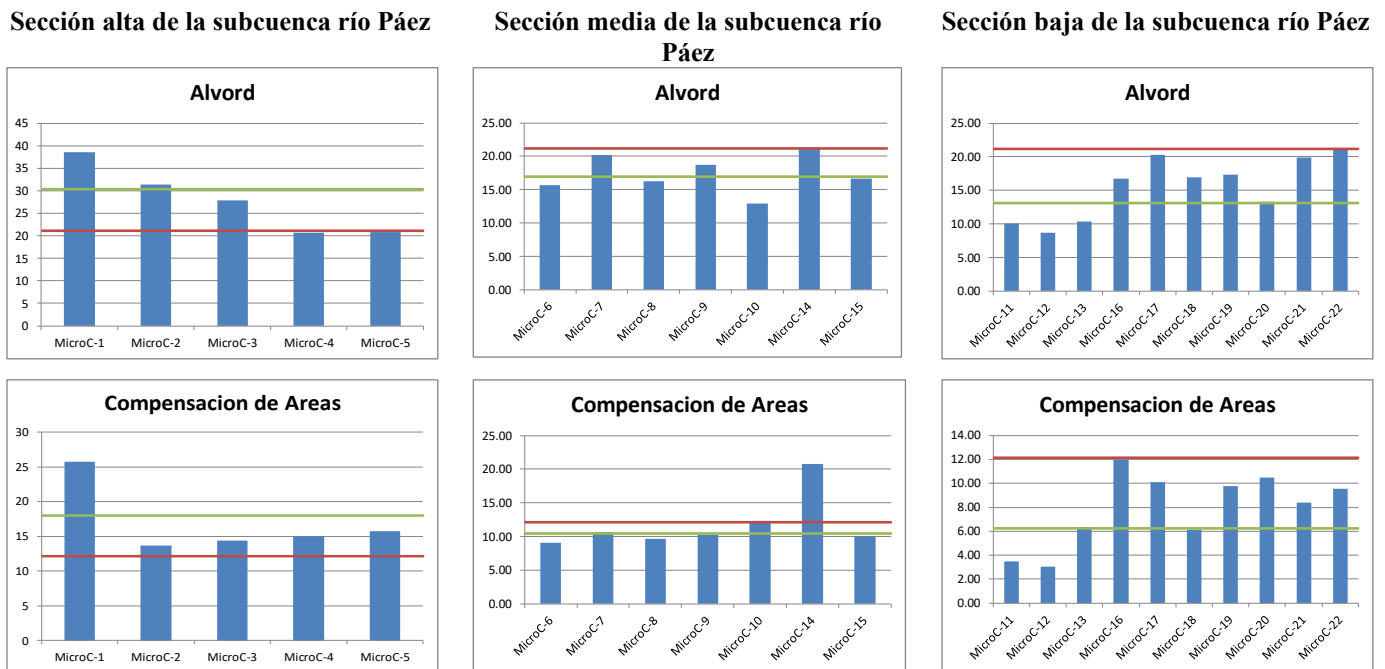
En tercer lugar se obtuvieron los valores de pendiente obtenidos en los dos criterios considerados (Alvord y compensación de áreas). Como era de esperar los valores de pendiente son mayores en la parte alta, media y baja de la cuenca respectivamente, para ambos criterios. Obteniendo una media ponderada para la parte alta de 30% y 18%, parte media de 17% y 10%, y parte baja de 13% y 6%, respectivamente para el criterio de Alvord y compensación de áreas. Entonces ya que la pendiente controla en gran medida la energía potencial y cinética de los flujos de agua en el paisaje (Zavoianu, 1985; Sreedevi et al., 2009), los resultados sugieren que la parte alta de la cuenca posee una mayor energía potencial y cinética de flujo de escorrentía, lo que minimiza la posibilidad de que la escorrentía se infiltre y presenten procesos de erosión y sedimentación. Por su parte, la parte media y baja, presentarán una mayor acumulación de sedimento y escorrentía, dado que la pendiente disminuye, favoreciendo a una reducción en la velocidad y agresividad de la escorrentía, adicionalmente se debe tener en consideración el caudal que se ha generado aguas arriba (Figura 17).

Los valores obtenidos de ambos criterios de pendiente no permiten establecer una jerarquía de las microcuencas (mayor pendiente a menor) concordante entre ambos criterios, pese a ello, se considerará el valor de pendiente obtenido con el criterio de compensación de áreas como el valor más aproximado a la realidad, siguiendo la recomendación de Villón (2004), este es un criterio de naturaleza más real de medir la pendiente en una cuenca ya que se obtiene a partir del perfil longitudinal del cauce, obtenido de un MDT.

Considerado lo anterior, la parte alta presenta la microcuenca 1 como la de mayor pendiente (26%), separándose mucho respecto a los valores de las demás microcuencas de la parte alta, cuyos valores oscilan entre 14% y 16%. Para la parte media la microcuenca 14 corresponde la de mayor pendiente, con 21%, mientras que las demás microcuencas oscilan entre 9% (correspondiendo a la microcuenca 6, donde se ubica el poblado de Cot) y 12%. Y en la sección baja, la microcuenca 16 representa la de mayor pendiente con 12%, igual a la media ponderada de la subcuenca. Las restantes microcuencas de esta última sección obtuvieron valores entre 3% (correspondiendo a la microcuenca 12 y 11, donde se ubica el poblado de Paraíso) y 10% de pendiente.

La pendiente de las microcuencas 1, 14, 5 y 4 al ser mayor a 15% sugieren una atención particular, ya que a partir de una inclinación de 12% y en particular las tierras bajo cultivos (como se presenta en el 68% de la subcuenca) requieren de prácticas importante de conservación (Mintegui et al., 2009), dado que disminuyen el tiempo del flujo terrestre y aumenta el volumen en flujo de corriente

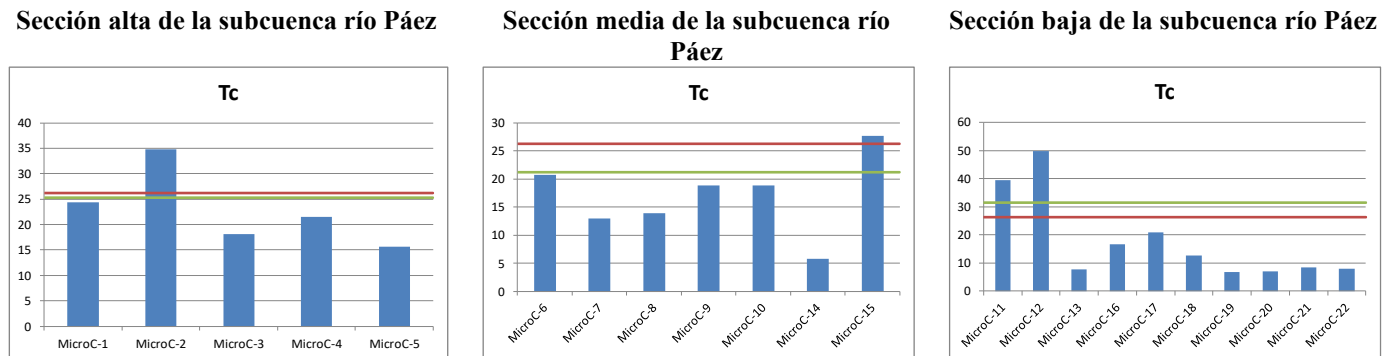
en tiempos cortos (Zavoianu, 1985), vinculando problemas de escorrentía superficial fuerte, sedimentación y erosión. Mientras que cuencas con valores muy bajos también debe de tenerse importante atención, dado que suponen terrenos más llanos y vulnerables a las inundaciones, a priori si se encuentran aguas abajo de cuencas con valores altos de pendientes, en este caso las cuencas 11, 12 y 6 que corresponden a las microcuencas más llanas y en las cuales se ubican los principales poblados (Paraíso y Cot) de la subcuenca en estudio, se les debe conferir una atención particularmente importante.



**Figura 17.** Valor de la pendiente (%) por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja. Línea roja es el promedio ponderado de la subcuenca en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuenca.

En cuarto lugar se describirán los valores obtenidos en el  $T_c$ , donde la media ponderada de la subcuenca se obtuvo un valor de 26,2 min, por debajo de 41,6 min que corresponde al límite superior de un  $T_c$  considerado como rápido. De igual forma la media ponderada de la sección alta, media y baja obtuvieron valores por debajo del anterior indicador, con 25,2, 21,2 y 31,56 minutos respectivamente. Por lo tanto, todas las microcuencas poseen una respuesta muy rápida a la precipitación, favoreciendo a un mayor volumen de escorrentía disponible en el cauce en un menor tiempo, acrecentando la posibilidad de crecidas (Fang et al., 2005; Gaspari et al., 2012),

principalmente en la salida de cada microcuenca. Las microcuencas con valores más lentos corresponden a la microcuenca 12, 11, 2 y 15, con 50, 40, 35 y 28 minutos, respectivamente. Debido, esta mayor duración en el  $T_c$ , a las menores pendientes y mayores longitudes que presentan (Figura 18).



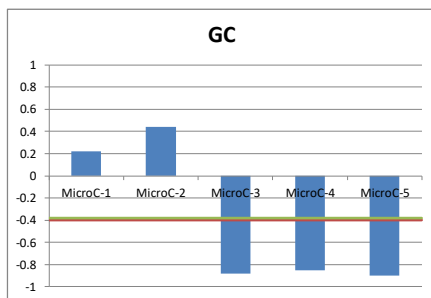
**Figura 18.** Valor de  $T_c$  (min) por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja. Línea roja es el promedio ponderado de la subcuenca en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuenca.

Los valores resultantes del  $GC$ , reflejan la conflictividad, donde a mayor conflictividad se suponen un mayor grado de deterioro ambiental (Danza & Sanabria, 2008). Para la media ponderada de la subcuenca resultó un valor de  $-0,40$ , es decir, una alta conflictividad del uso de la tierra en las AP de los drenajes, dominado por usos poco favorables como agrícola y urbano. De ello la sección media de la subcuenca presenta mayor conflictividad ( $-0,61$ ), lo cual era de esperar dadas las condiciones de pendiente más favorables y ubicación de los principales asentamientos humanos. Preocupando principalmente las microcuencas 6 y 14 de la cuenca media, 20 y 13 de la cuenca baja y 5, 3 y 4 de la cuenca alta. De hecho las únicas microcuencas con valores de  $GC$  positivos son la 1, 2 y 21, con  $0,22$ ,  $0,44$  y  $0,08$ , respectivamente, pese a que sigue presentando conflictos en las AP de estas microcuencas, hay un dominio de conflictos de usos de categoría I sobre los conflictos más deteriorantes (II y III) (Figura 19).

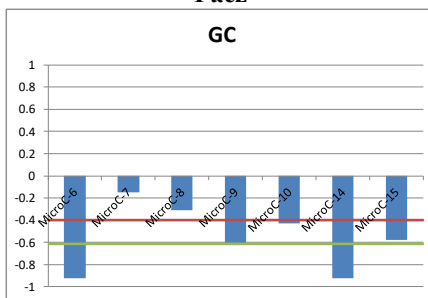
El  $GC$  sugiere que la subcuenca presenta una alta conflictividad en sus AP, donde impera la categoría II (agropecuario y cultivo, un 80% del área en conflicto de uso), por lo tanto, se infiere que las principales causas de la pérdida del ecosistema ripario de la microcuenca corresponde a la deforestación para la agricultura y ganadería, coincidiendo con los resultados de Esquivel y Valerio

(2013) en cuencas aledañas. Sin obviar la importante conflictividad que representan la expansión urbana (categoría III, con 16% del área en conflicto de uso), afectando principalmente la calidad del recurso (Buzolich et al., 2007) y acrecentando la vulnerabilidad de la comunidad al desbordamiento del cauce, debido a la mayor impermeabilidad de las zonas de amortiguamiento (AP). Por ende, es deseable implementar IV que fomenten la recuperación de los bosques de ribera como amortiguadores naturales de la escorrentía que incursa al cauce, además de favorecer la reducción de la velocidad de la escorrentía e infiltración, mediante una mayor rugosidad del terreno con vegetación y demás técnicas como pavimentos porosos u otras opciones (áreas especiales de infiltración) en las áreas urbanas principalmente (Ureña, 2002).

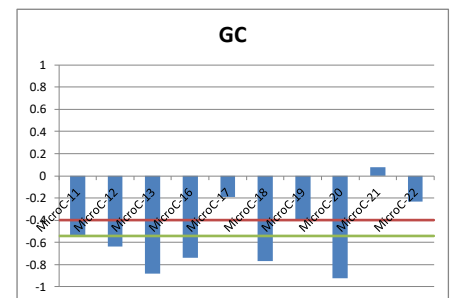
Sección alta de la subcuenca río Páez



Sección media de la subcuenca río Páez



Sección baja de la subcuenca río Páez

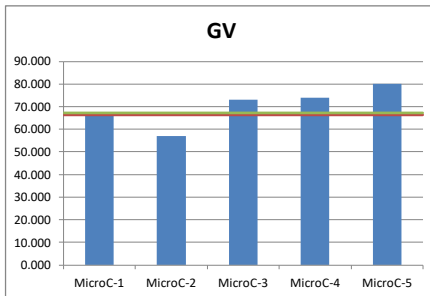


**Figura 19.** Valor de la GC por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja. Línea roja es el promedio ponderado de la subcuenca en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuenca.

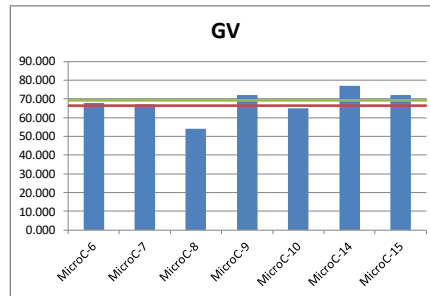
## 2. Objetivo 2. Determinación de zonas con mayor vulnerabilidad a inundaciones

El *GV* resultante de la media ponderado para la subcuenca es de 66 y de magnitud semejante se obtuvieron valores para la sección alta, media y baja, de 67, 69 y 63, respectivamente. Por lo tanto, la subcuenca presenta en todas sus secciones una vulnerabilidad a inundaciones semejante e importante por considerar, principalmente en la microcuenca 1 y 5, que denotan un *GV* en color rojo (valores 82 y 80 respectivamente), seguidos de las microcuencas 16, 4, 3, 15, 9 y 20, respectivamente, que adquirieron valores por arriba de la media de la subcuenca (Figura 14 y Figura 20).

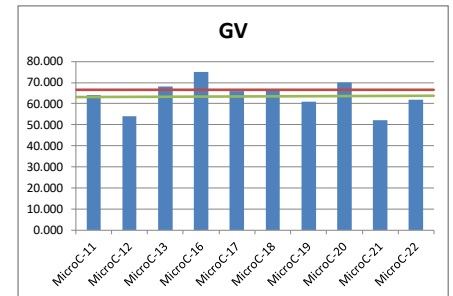
### Sección alta de la subcuenca río Páez



### Sección media de la subcuenca río Páez



### Sección baja de la subcuenca río Páez



**Figura 20.** Valor de GV por microcuenca, agrupados en cuenca alta, media y baja.

Línea roja es el promedio ponderado de la subcuenca en general, la línea verde es el promedio ponderado de la sección de la subcuenca.

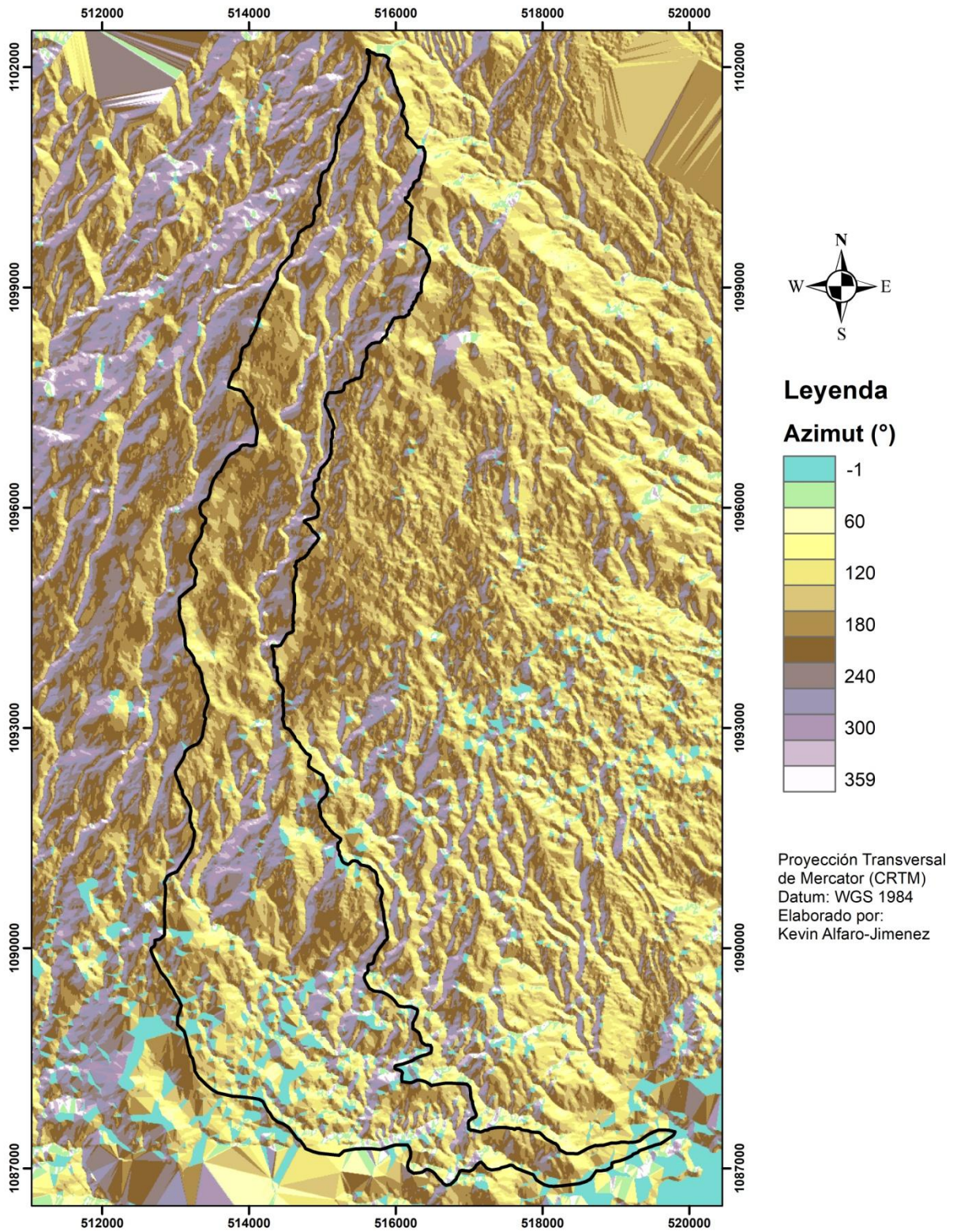
La *orientación* de las pendientes en la subcuenca, muestran una dominancia de las pendientes en la dirección sur y sureste, especialmente en la sección media. La sección alta muestra un dominio en la dirección sur, pero debido al sistema montañoso paralelo a la longitud de la cuenca (dirección nortesur), provoca direcciones de la pendiente tanto hacia el oeste como al este. La parte baja muestra una dominancia de las pendientes en la dirección este y noreste. Las zonas donde se indefine la orientación (valor de -1), se caracterizan por ser zonas planas (Olaya, 2004), en campo estas zonas corresponden a la sección baja de la subcuenca, principalmente en la ciudad de Paraíso, donde la pendiente es baja y existe una mayor presencia de zonas planas, generando zonas con mayor potencial a que la escorrentía se acumule por más tiempo en el paisaje (Figura 21).

La *curvatura* de la superficie muestra un relieve diverso de topografía cóncava y convexa, sin presentar una tendencia clara de uno o de otro (visualizado a gran escala), lo que sí es observable y adquiere principal interés son las zonas con valores tendientes a 0, pues estos refieren a zonas sin curvatura, es decir, zonas planas. Por lo tanto, en estas áreas la dinámica de la escorrentía es más pausada, debido a que no hay tanto proceso de divergencia o convergencia de los flujos de escorrentía (Olaya, 2004), lo que aumenta la vulnerabilidad a inundaciones, de hecho estas áreas y las zonas donde se indefine la orientación se sobreponen, infiriendo una vulnerabilidad importante (Figura 22).

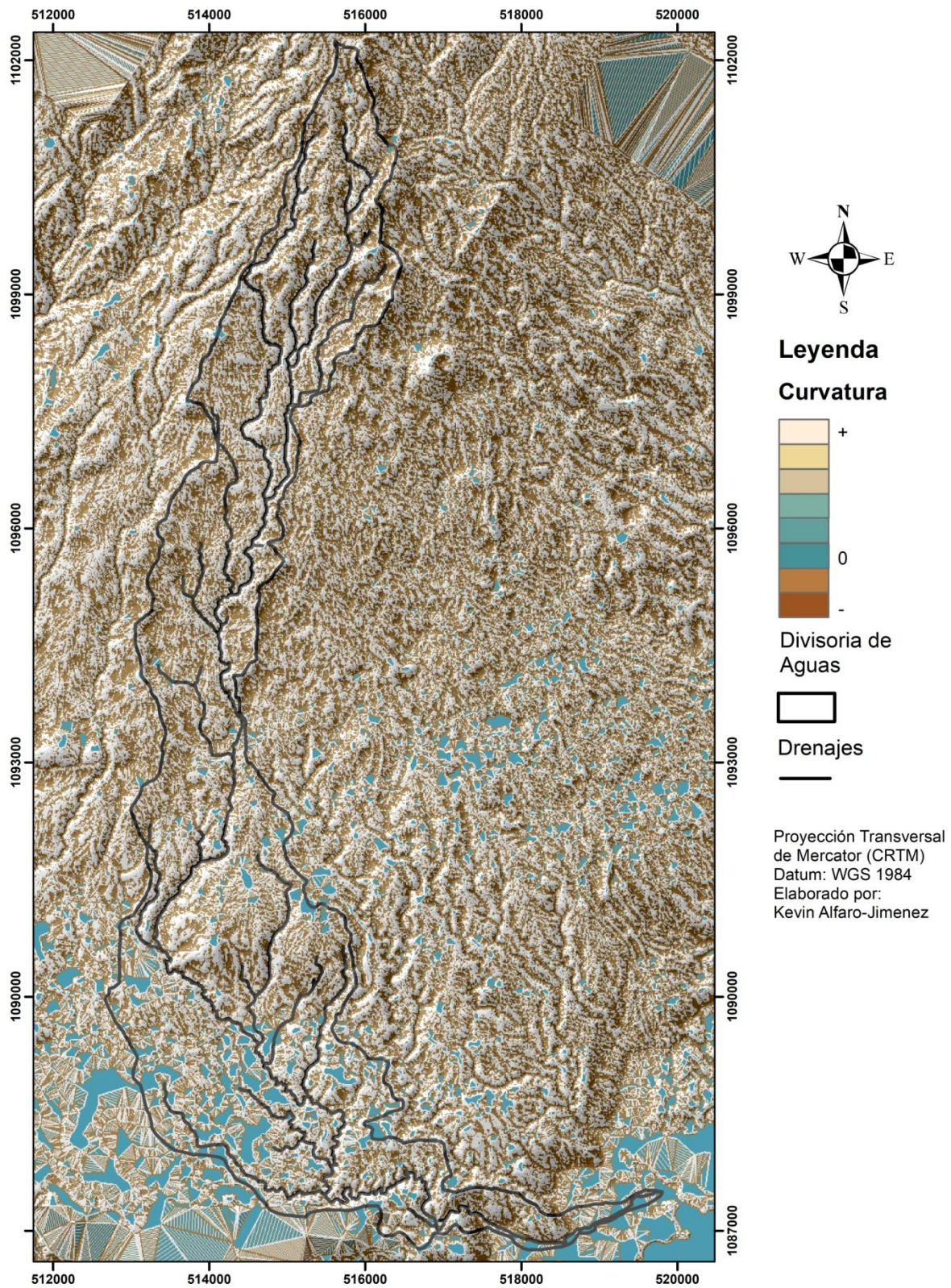
En síntesis la parte alta genera mayor dinamismo y energía cinética de la escorrentía del paisaje, adquiriendo una mayor probabilidad a crecidas espontáneas, debido a sus valores más altos en los parámetros de drenaje y pendientes pronunciadas, añadiendo otros problemas como erosión y

sedimentación, principalmente en las microcuencas 3, 4 y 5. La parte media posee una vulnerabilidad importante debido a un mayor  $GC$ , que se refleja en una mayor impermeabilidad y homogeneidad de la superficie (menor rugosidad), aumentando la vulnerabilidad al desbordamiento de los cauces, principalmente en las salidas de las microcuencas 6 (donde se ubica Cot, que presenta bajas pendientes), 9, 14 y 15. La parte baja posee particular problema con los parámetros de formas tendientes a la circularidad, por lo tanto, el tiempo de recorrido de la escorrentía al punto central son semejantes, generando un alto volumen de escorrentía al mismo tiempo, además de  $GC$  altos y pendientes bajas (Cuadro 15).

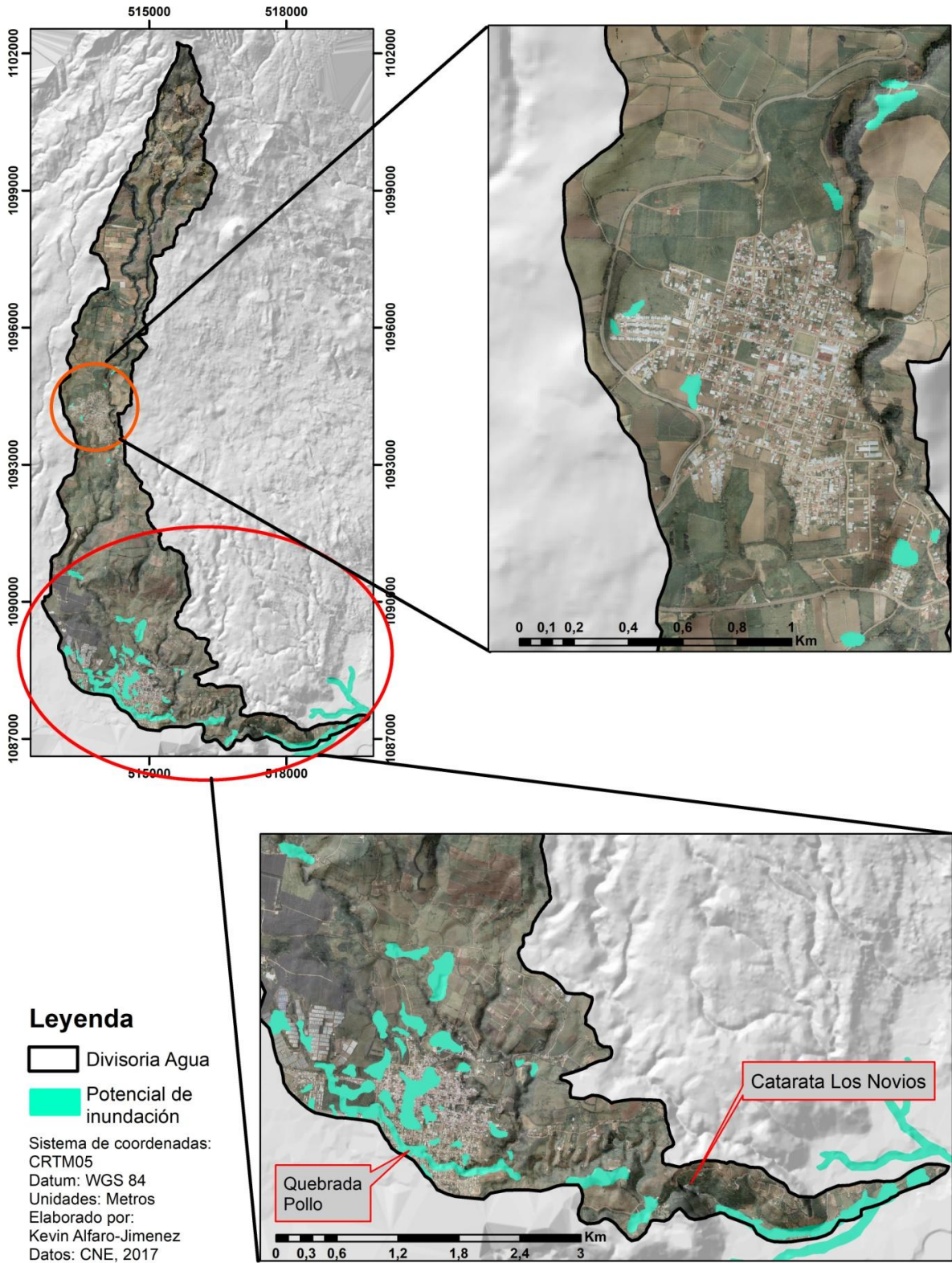
Por ende, se puede interpretar que la cuenca alta es la generadora del dinamismo y torrencialidad de la escorrentía, dando velocidad y fuerza al flujo de agua, mientras que la cuenca media se puede interpretar como una contribuidora de volumen de agua superficial, dada su alta impermeabilidad en las AP y pendientes medias. Por último, la cuenca baja se puede interpretar como la receptora, dado que presenta pendientes bajas, zonas planas, forma de cuencas circulares, una importante impermeabilidad en las AP y otra importante impermeabilidad de la superficie en general debido a la presencia de centros urbanos (Paraíso). Sugiriendo que al considerar los problemas cuencas arriba (que indican un alto potencial cinético y volumen de escorrentía), la sección baja es importantemente vulnerable a inundaciones, en especial en las microcuencas 11 y 12 por sus bajas pendientes y dominio de zonas planas (reflejado en la curvatura y orientación de la pendiente) y microcuencas 13, 16 y 20, focalizando la atención en el tramo de la quebrada Pollo que cruza la comunidad de Paraíso y se ubica en la microcuenca 12 y el tramo del río Páez posterior a la catarata Los Novios y la desembocadura de este mismo río (Figura 23, se detalla las zonas con potencial a inundación), los cuales el CNE ha señalado como sitios potenciales a la ocurrencia a eventos de inundación.



**Figura 21.** Orientación (°) de las pendientes en la subcuenca río Páez



**Figura 22.** Curvatura de la superficie en la subcuenca río Páez



**Figura 23.** Zonas más vulnerables a inundaciones en la subcuenca río Páez

### 3. Objetivo 3. Ubicación de áreas potenciales para IV urbana

Esta sección desarrolla los resultados obtenidos del censo del AURP y AV visibles de la comunidad de Cot y Paraíso, considerando principalmente el área de las copas de los árboles y área de las AV, para la zonificación de las IV, además de otras variables que permitieron comprender de forma cuantitativa la importancia de las AV identificadas.

Se censaron 252 árboles entre la comunidad de Cot (12 árboles) y Paraíso (240 árboles), cubriendo por efecto de copa un área de 43,5 m<sup>2</sup> en Cot y 4 739 m<sup>2</sup> en Paraíso, lo que representa tan solo el 0,01% y 0,32% del área de cada centro urbano respectivamente, por lo tanto, el aporte del AURP sobre la interceptación de la precipitación es prácticamente nulo (Cuadro 19). Las AV cubrieron el 0,45% del territorio de la ciudad de Cot y el 3,36% de la ciudad de Paraíso, es decir, 3 750 m<sup>2</sup> en Cot (con una única AV) y 49 169 m<sup>2</sup> en Paraíso dividida en 19 AV con un promedio de 2 588 m<sup>2</sup> y un área mínima y máxima de 130 m<sup>2</sup> y 17 181 m<sup>2</sup>, respectivamente. Sin embargo, pese a que se identificaron 20 AV, gran parte de ellas no corresponden a sitios de acceso público como tal, pues muchos son lotes baldíos (45% de las AV), pero que corresponden a espacio que entran dentro de la definición de AV y los cuales podrían ocuparse para el acceso público (Cuadro 18).

Esta poca cantidad de IV urbana identificada sugiere que los centros urbanos están saturados de edificaciones lo que amerita una necesidad de generar espacios verdes que permitan obtener servicios ecosistémicos, pensando en opciones alternativas como anillos verdes en el perímetro de la comunidad y estratégicas y diversificadas IV dentro de la comunidad (aunque en menor proporción debido a lo saturado de las edificaciones), teniendo en cuenta la importancia de los patrones del paisaje como lo expone Woo y Park (2016) y la importancia de erradicar la fragmentación del paisaje. Un ejemplo de acciones generadoras de espacios verdes y con servicios orientados al aumento de la resiliencia ante inundaciones es el trabajo de Olmsted con el desarrollo del sistema Esmeralda de Boston, mediante la vinculación de varios parques metropolitanos diseñados para que ayuden a controlar el exceso de flujos de agua en los límites de la ciudad (Mell, 2008).

Respecto al índice %IZV (índice de importancia de zonas verde), se obtuvo un promedio de 66% con un mínimo de 32% y máximo de 95%. Lo que sugiere que en general las AV zonificadas poseen un potencial por arriba de la media según el índice, en especial los lotes 4, 8, 14, 18, 19 y 20 que estuvieron por encima de un 80%, reflejando un alto potencial para brindar servicios ecosistémicos (Cuadro 17). Es curioso que si se observan estas AV en el mapa, se notará que todas están ubicadas

en la periferia del centro urbano, figurando que quizá sea más factible la implementación de estrategias de IV orientadas a anillos verdes con moderadas IV dentro del centro urbano (Figura 24 y Figura 25). Por lo tanto, es importante tomar acciones para establecer estas áreas como legítimas AV, acondicionando el sitio de tal manera que la comunidad esté enterada de la importancia de estos, en especial ante el CC.

**Cuadro 17.** Valores obtenidos en las variables del índice de %IZV y resultado de este por AV

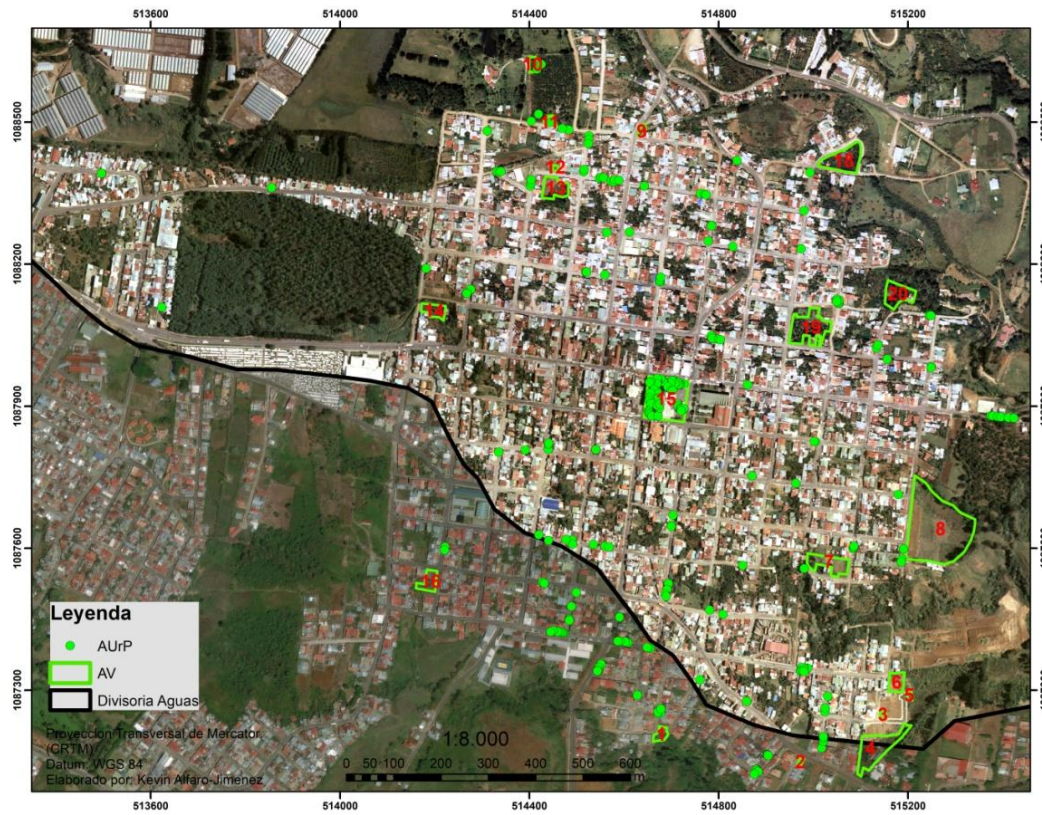
# lote	Cobertura del suelo		Estado del suelo		Área del lote			Área copa			%IZV	
	X	V	X	V	(m <sup>2</sup> )	X	V	(m <sup>2</sup> )	(%)	X		V
1	4	16	3	6	647	2	10	133	21	2	6	68
2	4	16	3	6	133	1	5	0	0	1	3	54
3	4	16	4	8	185	1	5	0	0	1	3	57
4	4	16	4	8	4 336	4	20	776	18	2	6	89
5	4	16	4	8	232	1	5	0	0	1	3	57
6	1	4	3	6	1 200	3	15	0	0	1	3	50
7	1	4	4	8	2 457	3	15	0	0	1	3	54
8	4	16	4	8	17 181	4	20	0	0	1	3	84
9	3	12	2	4	268	1	5	0	0	1	3	43
10	4	16	4	8	483	1	5	0	0	1	3	57
11	4	16	4	8	177	1	5	0	0	1	3	57
12	2	8	1	2	130	1	5	0	0	1	3	32
13	4	16	1	2	1 953	3	15	0	0	1	3	64
14	4	16	4	8	1 150	3	15	414	36	3	9	86
15	1	4	3	6	7 403	4	20	2 275	31	3	9	70
16	4	16	2	4	1 194	3	15	177	15	1	3	68
17	1	4	3	6	3 751	4	20	546	15	1	3	59
18	2	8	4	8	3 409	4	20	2 827	83	4	12	86
19	4	16	4	8	4 254	4	20	2 041	48	3	9	95
20	4	16	4	8	2 376	3	15	2 147	90	4	12	91
<b>TOTAL/ PROMEDIO</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>52 919</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>11 336</b>	<b>21</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>66</b>

**Cuadro 18.** Superficie de AV urbanas identificadas en la subcuenca río Páez

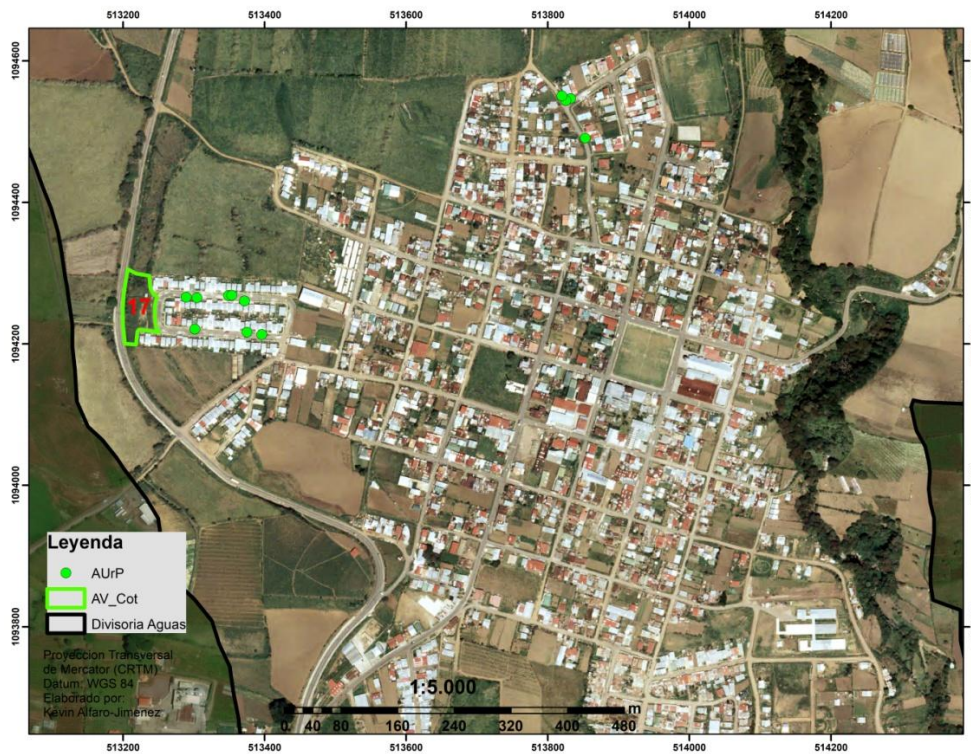
Variable	General	Cot	Paraíso
Cantidad de AV (#)	20	1	19
<b>AV</b>			
Total (m <sup>2</sup> )	52 919	3 750	49 169
Promedio (m <sup>2</sup> )	2 646	3 750	2 588
Mínimo (m <sup>2</sup> )	130	3 750	130
Máximo (m <sup>2</sup> )	17 181	3 750	17 181
<b>%IZV</b>			
Promedio (%)	66	59	66
Mínimo (%)	32	59	32
Máximo (%)	95	59	95

**Cuadro 19.** Variables del AUrP censado en la comunidad de Cot y Paraíso, subcuenca río Páez

Variable	General	Cot	Paraíso
Individuos (#)	252	12	240
<b>DAP</b>			
Promedio (cm)	23,9	3,3	12.46
Mínimo (cm)	10	12	10
Máximo (cm)	85,0	15,1	85
<b>Área Copa</b>			
Total (m <sup>2</sup> )	4 805	44	4 739
Promedio (m <sup>2</sup> )	19,1	3,6	19,7
Mínimo (m <sup>2</sup> )	0,2	0,4	0,2
Máximo (m <sup>2</sup> )	254,5	12,5	254,5



**Figura 24.** I.V. identificada en la comunidad de Paraíso de Cartago, subcuenca río Páez



**Figura 25.** I.V. identificada en la comunidad de Cot de Oreamuno, subcuenca río Páez

#### **4. Objetivo General. Determinación de zonas de IV para reducir el volumen de escorrentía y mitigar la vulnerabilidad a inundaciones**

En esta sección se desarrollan los resultados respecto al objetivo general de la investigación, así como también se aborda la hipótesis. Se describe y discute sobre las zonas determinadas para el desarrollo de IV y sobre la incidencia de estas en el volumen de escorrentía y mitigación de la vulnerabilidad a inundaciones. Para desarrollar la sección se iniciará con los aspectos generales a nivel de subcuenca, posteriormente a nivel de sección de la cuenca (alta, media y baja) y está a su vez detallando a nivel de microcuenca, focalizando la atención en las microcuencas 0, 11 y 12, que se han identificado con un alto potencial de vulnerabilidad a inundaciones.

La Figura 26 muestra las IV presentes en la subcuenca, es decir, el que se podría considerar como escenario base (Esce-B), donde se ha definido como IV presente aquellas zonas bajo cultivo permanente (cult-perm), zonas boscosas (bosque) y la IV urbana zonificada en el objetivo 3, todo lo cual representa el 18% de la superficie de la subcuenca. A partir de este escenario se establecieron tres escenarios más, el primero el más optimista (esce-1), el segundo con un optimismo moderado

(esce-2) y el tercero el más restrictivo (esce-3; Figura 27). En los cuales se definió una tipología para las IV determinadas, a) las IV urbanas, integrada por todas las IV ubicadas dentro de los centros urbanos, b) las IV agrícolas, integradas por aquellas que se ubicarían en las áreas que hoy día están bajo uso agrícola o pastos, y c) las áreas boscosas, integradas principalmente por bosques ribereños y zonas con presencia dominante de árboles.

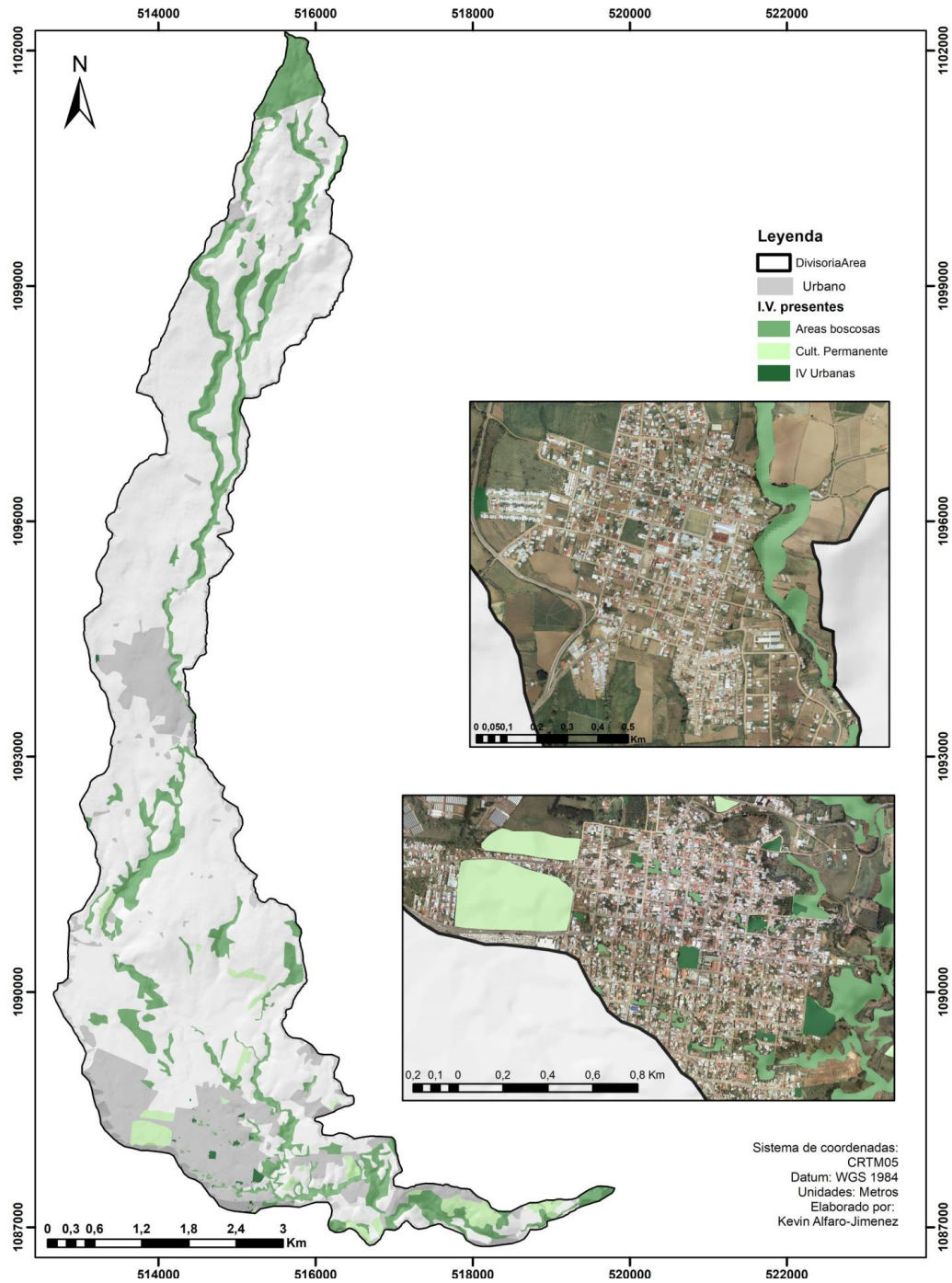


Figura 26. Escenario base (Esce-B), subcuenca río Páez

Como era de esperar los porcentajes de uso de la tierra agrícola (agro-cult) y urbano son los que más varían hacia abajo en los escenarios establecidos, principalmente en el esce-1 y esce-2, mientras que el porcentaje de IV aumenta en estos escenarios. Por lo tanto, este oscilamiento permite un incremento de coberturas más favorables respecto al incremento de resiliencia de las comunidades a las inundaciones y crecidas, llegando a reducir un 14% del aporte de esorrentía, en el esce-1 y un 5% en el esce-2, mientras que en el esce-3 pese a que aumento sus IV en un 6% pareciera ser un aumento poco considerable para generar una reducción permisible en la esorrentía (Cuadro 20).

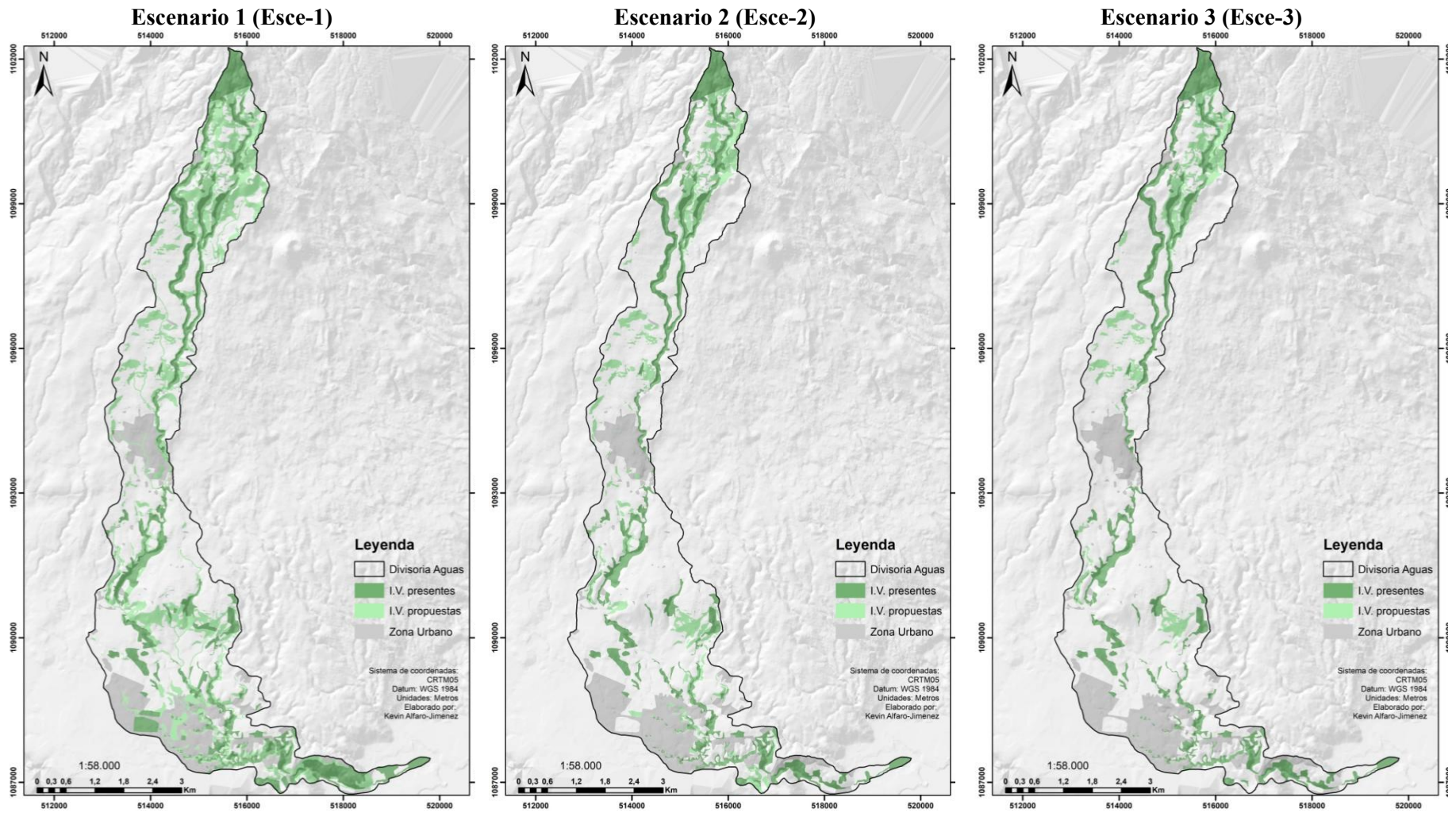


Figura 27. Escenarios de intensificación de I.V. propuestos (Esce-1, 2 y 3), subcuenca río Páez

A escala “media”, es decir, de acuerdo al promedio de la sección alta, media y baja de la subcuenca se observan variaciones porcentuales más favorables a la reducción de escorrentía en comparación a los valores a escala de subcuenca, en los tres escenarios y para las tres secciones. Correspondiendo con lo indicado por los autores Mintegui et al. (2009) y Vigiak et al. (2007), quienes referían a que el efecto de la cobertura forestal en la hidrología se reflejaba más en cuencas pequeñas (escalas menores) que en cuencas grandes. Por un lado, disminuye considerablemente el porcentaje de uso agro-cult en todos los escenarios respecto al esce-B de cada sección, y por otro lado, aumentan importantemente las IV propuestas, resultando teóricamente que a escala medias las reducciones porcentuales de la escorrentía son más permisibles, siendo mayores en la cuenca alta, seguido de la cuenca baja y media, respectivamente. Lo cual es apropiado, dado que anteriormente se definió la sección alta como la potenciadora del dinamismo de escorrentía (generadora de crecidas) y cuenca baja como la más vulnerable a inundaciones, por lo tanto, se observa que las IV propuestas correspondieron en una mayor disminución en la escorrentía de estas dos secciones.

Detallando en la cuenca alta, la implementación de las IV en todas las áreas determinadas permitirían una reducción en la escorrentía de un 74% para el escenario más optimista a un 31% en el escenario más restrictivo, a razón de una disminución en el área bajo uso de agro-cult, pasando de un 85,8% del esce-B a un 55,3%, 70,4% y 74,6% para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente y una reconversión de estas áreas a IV, aumentando una cobertura más favorable al control de la escorrentía en un 28,9%, 15,8% y 17% para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente. Destacando en esta sección la microcuenca 1 y 5 las cuales presentan en todos los escenarios reducción de escorrentías por arriba de un 63%, lo que quiere decir que son consideradas de importante intervención; mientras que la microcuenca 4 se puede considerar de importancia media de intervención.

La cuenca media presenta en promedio un esce-B menos boscosos (<10%), con más área urbana (6,3%) y más área en agro-cult (87,4%), presentando además poca disminución de áreas bajo uso agro-cult y poca áreas propuestas a IV en los escenarios propuestos. Con referencia a los escenarios propuestos, para esta sección de la subcuenca, el esce-1 propone un aumento de IV que va de 0,9% (microcuenca 10) a 28,6% (microcuenca 14), con un promedio de 12,2%. Promoviendo la reducción de escorrentía de 0% (microcuenca 10) hasta un 68% (microcuenca 7), con un promedio de 33%. El esce-2 propone un aumento promedio de un 9,8% en IV, con una combinación de microcuencas sin aumento (microcuenca 15 y 8) hasta microcuencas con un aumento de un 28,5% (microcuenca 14),

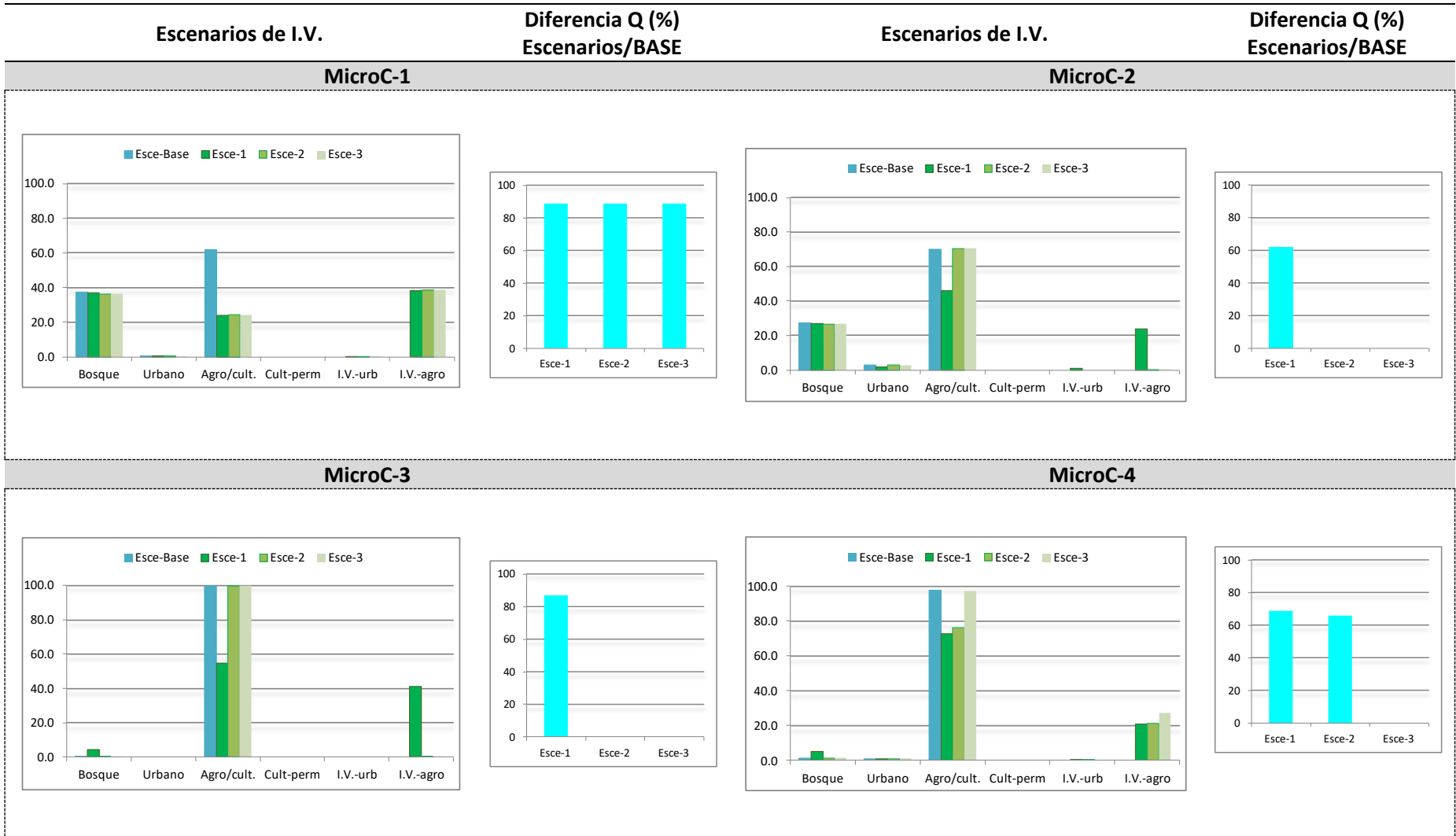
generando la reducción de la escorrentía en un 24% en promedio, siendo mayor en la microcuenca 7 con un 68%, a diferencia de las microcuencas 15, 10 y 8 donde no hubo reducción permisible de escorrentía. Por último, en el esce-3, solo se da el aumento de IV en la microcuenca 9 con 14,8%, lo que representa en promedio un 2,1% en la cuenca media, lo que permitiría la reducción de un 33% de la escorrentía de la microcuenca 9, y un 9% en promedio para la cuenca media. De esto hay que recalcar el hecho de que a medida que se vuelve más restrictiva la propuesta de IV, así también son más las microcuencas sin reducciones de escorrentías permisibles. También es notoria la importancia de intervenir principalmente las zonas altas, considerando el principio de Ferrando (2006), quien indica que las acciones de intervención deben de implementarse desde las zonas altas de la cuenca hasta las desembocaduras de estas.

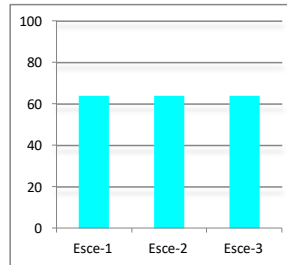
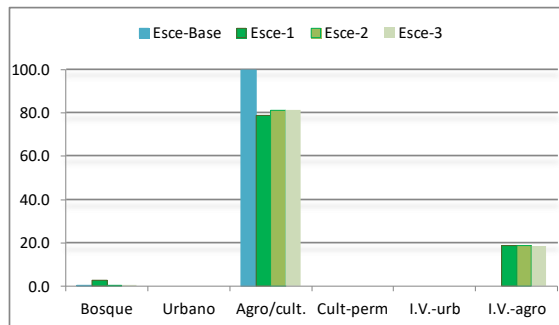
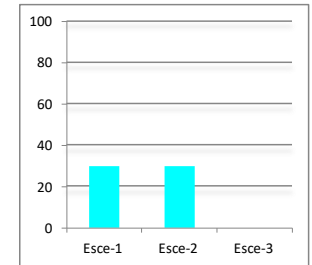
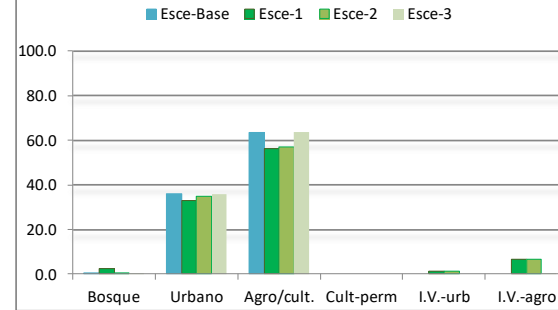
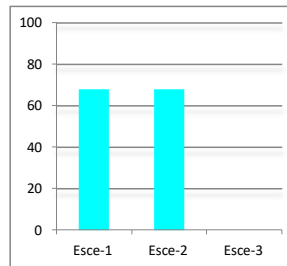
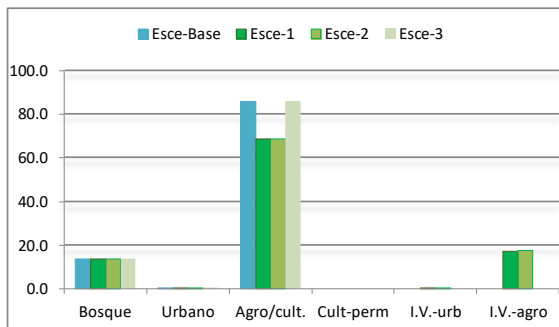
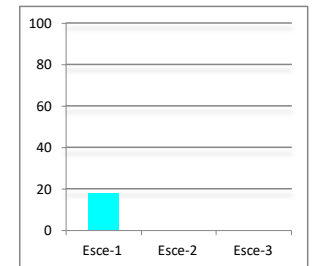
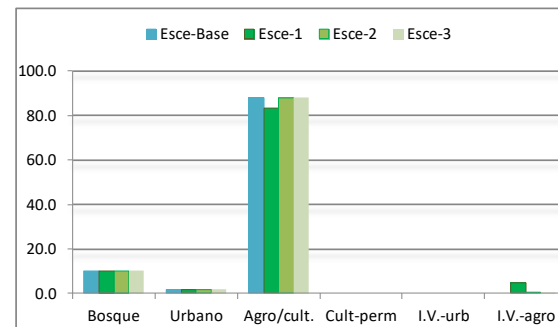
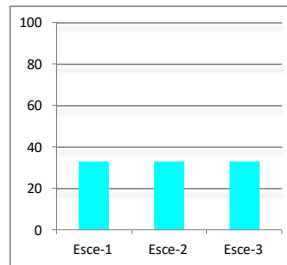
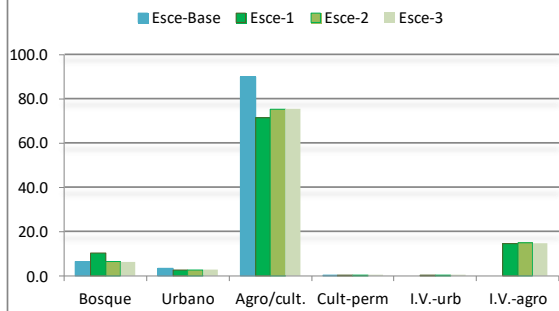
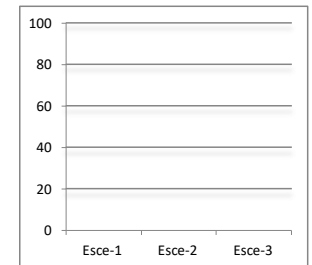
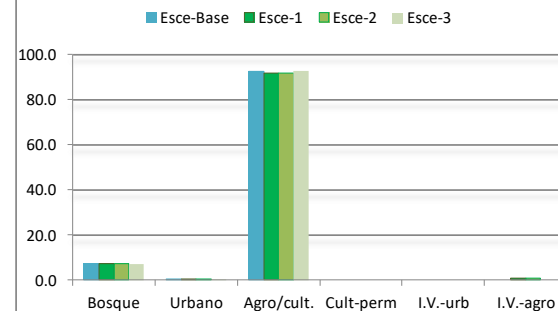
La cuenca baja presenta un esce-B promedio más equilibrado porcentualmente al respecto de los usos de la tierra, con un 12,7% en bosque, 29% urbano, 54,1% agro-cult y 4,3% en cult-perm, destacando de esta sección la presencia de mayor proporción de cult-perm (la cual es considerado como una IV). Respecto a los escenarios propuestos, el esce-1 propone un aumento de IV que va de 6.6% (microcuenca 12) a un 17% (microcuenca 17), con un promedio de 12,9%. Propiciando la reducción de escorrentía de 6% (microcuenca 12) a un 69% (microcuenca 7), con un promedio de 47%. El esce-2 propone un aumento de IV en las microcuencas desde un 17% (microcuenca 17) hasta microcuencas sin presencia de IV (microcuenca 19 y 12), con una media de 9,8% para la sección baja. Generando la reducción hasta en un 65% en la microcuenca 22, mientras que otras microcuencas no se reportaron reducciones permisibles de escorrentía (microcuenca 19 y 12), promediando una reducción de escorrentía en la sección baja de un 36%. Por último el esce-3, en la sección baja de la subcuenca, promueve únicamente el aumento de IV en la microcuenca 16 con un 16,2%, lo que permitiría reducir un 51% de la escorrentía en dicha microcuenca, pero solo un 5% en promedio a nivel de cuenca baja.

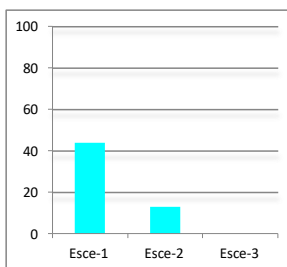
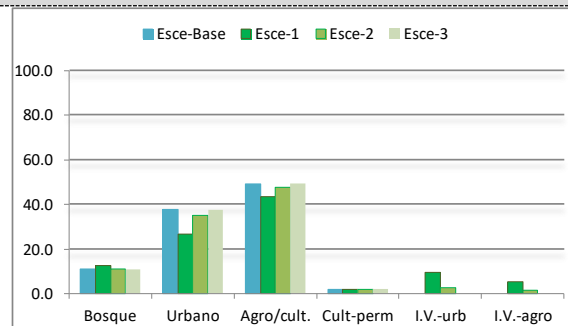
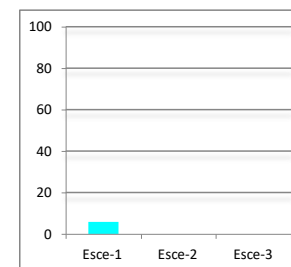
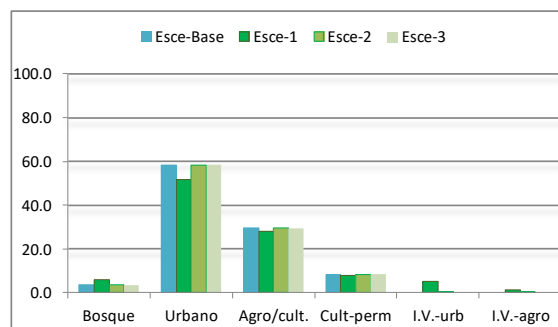
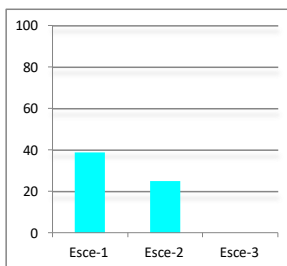
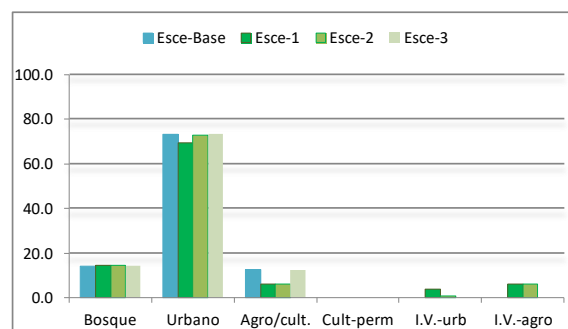
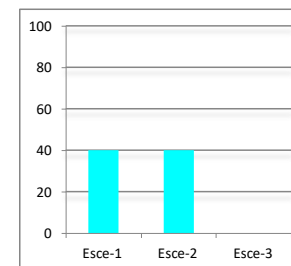
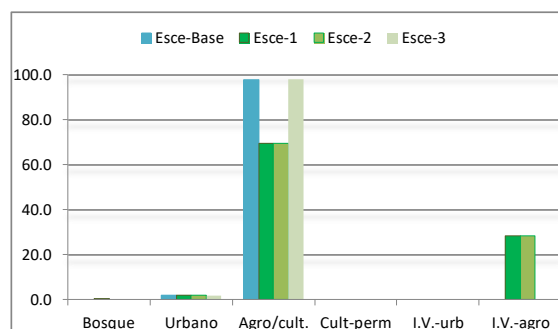
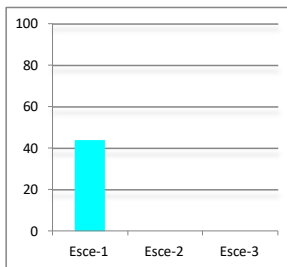
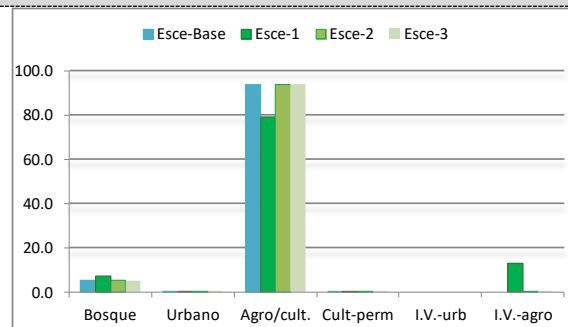
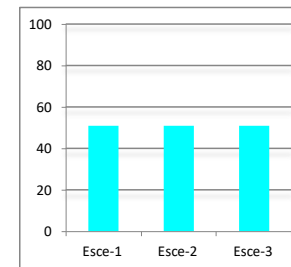
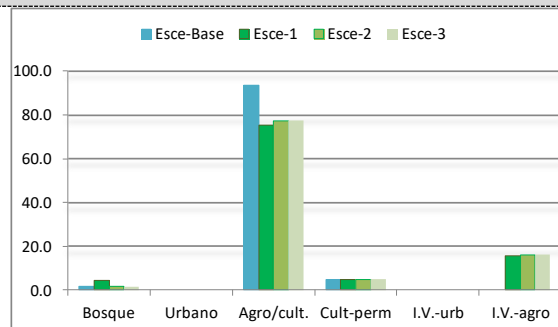
**Cuadro 20.** Porcentaje de superficie de cada polígono de uso de la tierra y porcentaje de disminución de la escorrentía base por escenario de I.V. propuesto, subcuenca río Páez



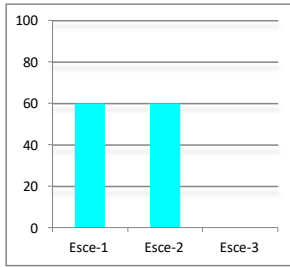
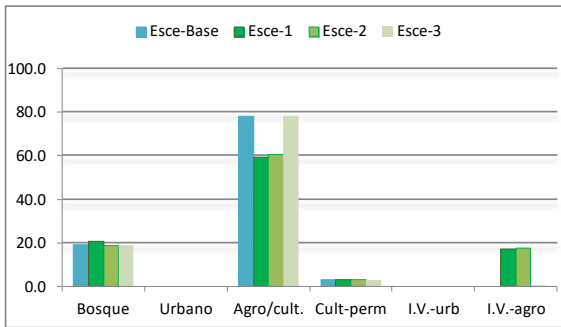
**Cuadro 21.** Porcentaje de superficie de cada polígono de uso de la tierra y porcentaje de disminución de la escorrentía base por escenario de I.V. propuesto, subcuenca río Páez



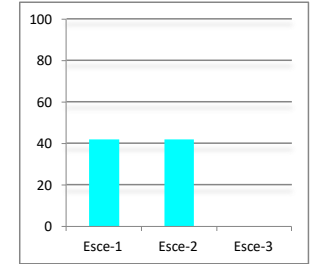
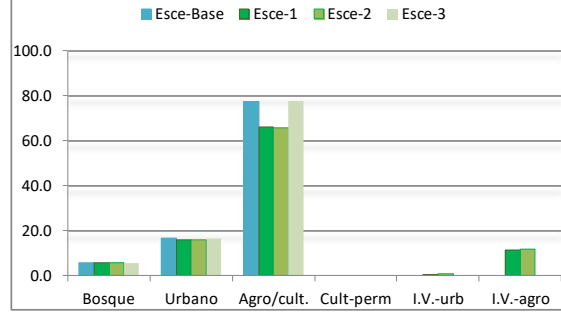
**MicroC-5****MicroC-6****MicroC-7****MicroC-8****MicroC-9****MicroC-10**

**MicroC-11****MicroC-12****MicroC-13****MicroC-14****MicroC-15****MicroC-16**

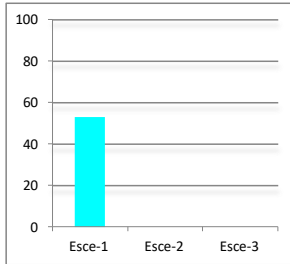
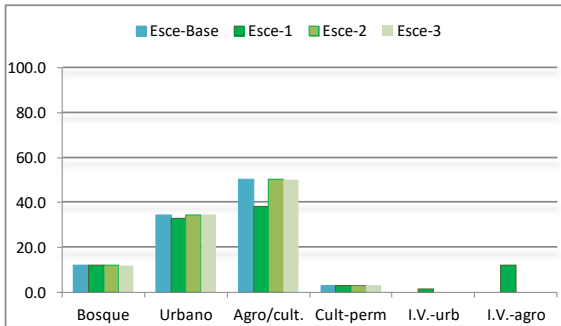
**MicroC-17**



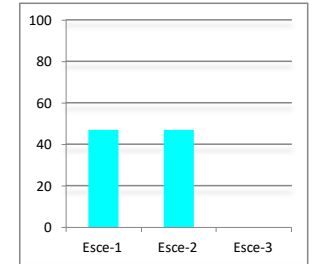
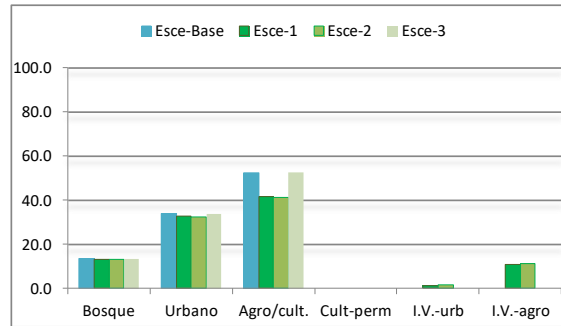
**MicroC-18**



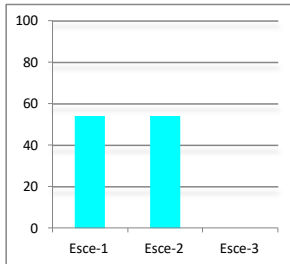
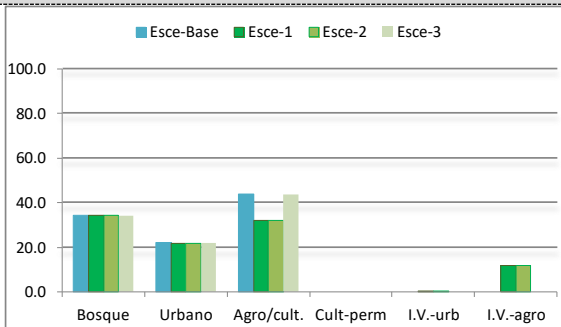
**MicroC-19**



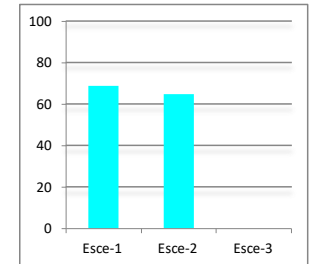
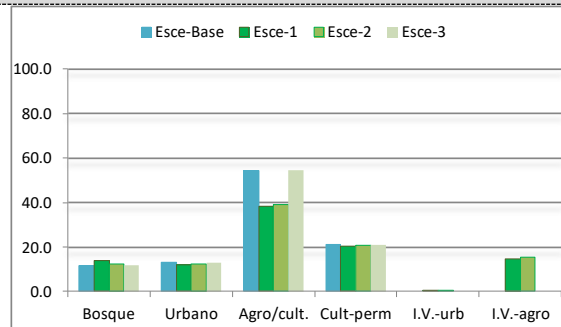
**MicroC-20**



**MicroC-21**



**MicroC-22**

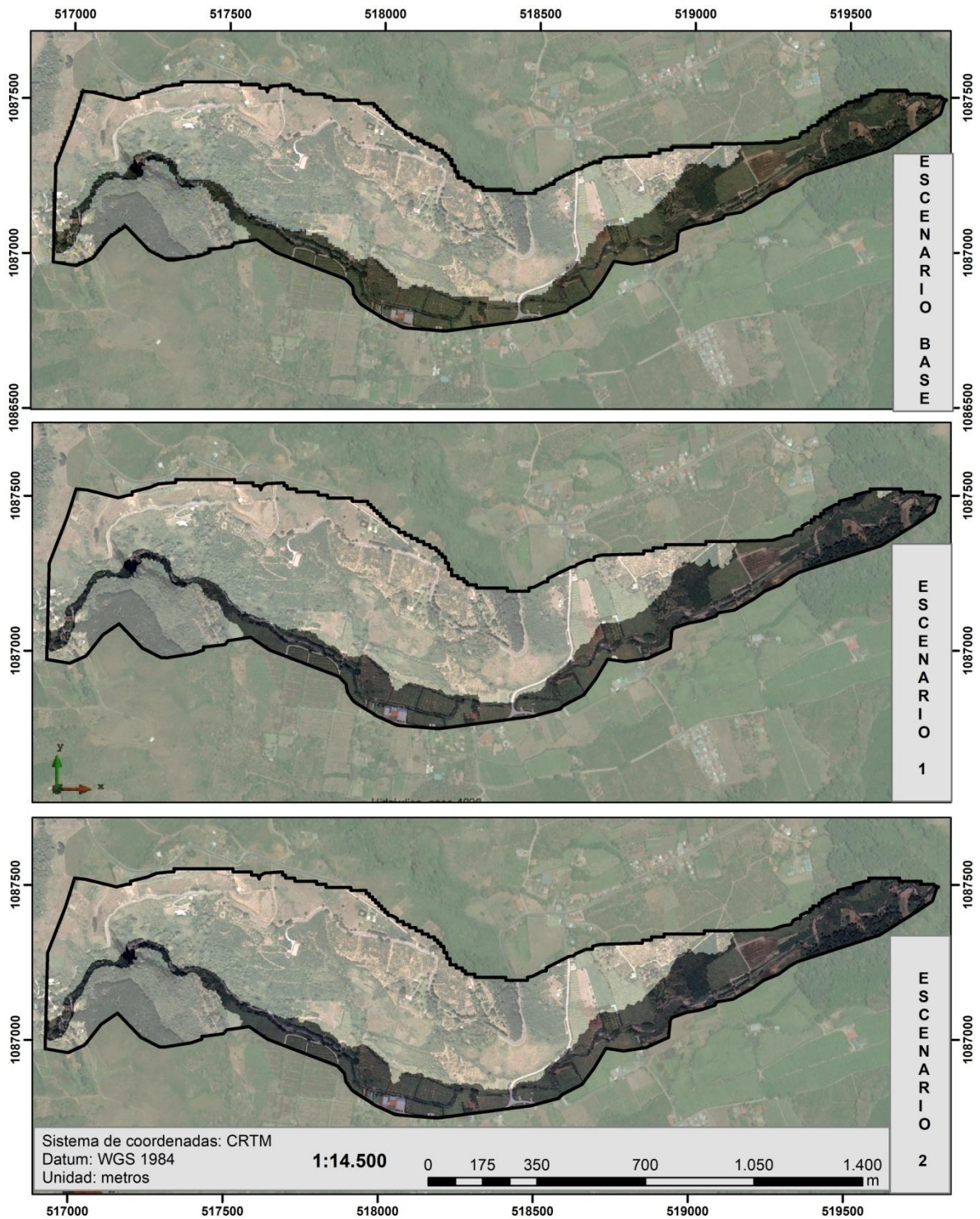


Respecto a los resultados del modelado del caudal de las tres secciones con mayor incidencia a inundaciones, es decir, (a) micro-0, sección posterior a la catarata Los Novios (Figura 28); (b) micro-11, la sección de la quebrada Lavatripas (Figura 29); y (c) micro-12, sección de la quebrada Pollo (Figura 30). A gran escala no se obtuvieron mayores diferencias entre los escenarios respecto al esce-B. Las mayores diferencias, respecto al esce-B, se obtuvieron en el esce-1 y en menor porcentaje en el esce-2. El esce-3 mostro, en general, valores iguales al esce-B, por lo cual no se muestra el resultado de este escenario.

La sección micro-0 representa el caudal de toda la subcuenca del Páez. En esta sección al aumentar las IV en un 17,7% en el esce-1 se reduce un 14% el caudal máximo y en el esce-2 un aumento de un 8,6% de I. redujo en un 5% el caudal máximo. De manera semejante Little & Lara (2010) obtuvieron que con un aumento de un 10% de plantaciones con especies de rápido crecimiento se reducen hasta un 20% del caudal. Probablemente porque gran parte de la escorrentía, al presentarse un aumento de cobertura vegetal en las IV, tiene una mayor posibilidad de infiltrarse nuevamente antes de llegar al cauce (Bruijnzeel et al., 2005).

La sección micro-11 es la que presentó mayores reducciones de escorrentía y caudal máximo mayores, respecto al esce-B, obteniendo en el esce-1 y 2 una reducción porcentual en caudal máximo de 44% y 13%, respectivamente, al aumentar en un 14,8% la IV en el esce-1 y un 4,4% en el esce-2. La sección micro 12 presentó las menores reducciones de caudal máximo para los escenarios, con 6% (a pesar de aumentar un 6,6% de IV en el esce-1) y 0% en los escenarios 1 y 2 respectivamente. Al respecto, estudios como el Yao et al. (2015), que utilizando el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos, evaluaron las reducciones de escorrentía superficial asociados con el espacio verde urbano del centro de Beijing, resultando que los espacios verdes retuvieron más de un 30% de la escorrentía, al añadir casi un 11% más de cubierta arbórea. Koch (2005) utilizando el modelo de número de curva predijo que la presencia de un 22% de cobertura reduce la escorrentía en un 7%. Highfield (2012), encontró que un aumento del uno por ciento en matorrales y arbustos podrían disminuir los caudales anuales máximos en 16,9 a 18,7% en la costa de Texas.

Los mejores resultados en la reducción de escorrentía y caudal máximo de la sección micro-11, en comparación a la sección micro-12, se puede deber a una menor superficie impermeable mostrada en la sección micro 11 (con valores superficie urbana de 37,7% en el esce-B a un 26,9% en el esce-1), en comparación con la micro 12 (con valores superficie urbana de 58,5% en el esce-B a un 51,8% en el esce-1). Concordando con lo indicado por Liu, Chen, y Peng (2014), quienes en su estudio concluyeron que las superficies impermeables tienen la mayor contribución a los escurrimientos de tormenta de la comunidad y el escenario con configuración de IV integrada tiene un porcentaje de reducción de escorrentía efectivo.



**Figura 28.** Modelado del caudal, sección micro 0, catarata Los Novios

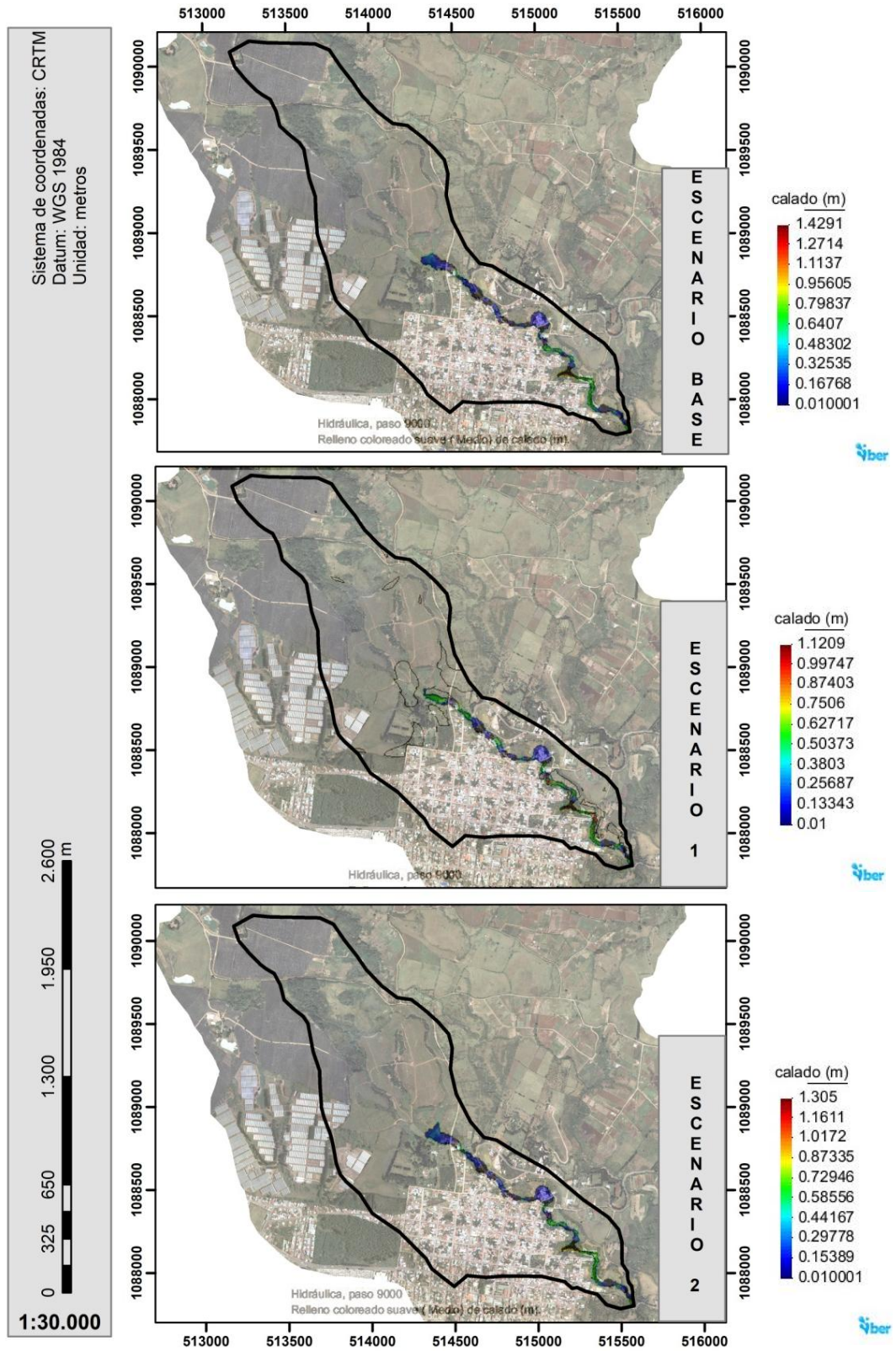


Figura 29. Modelado del caudal, sección micro 11, quebrada Lavatripas

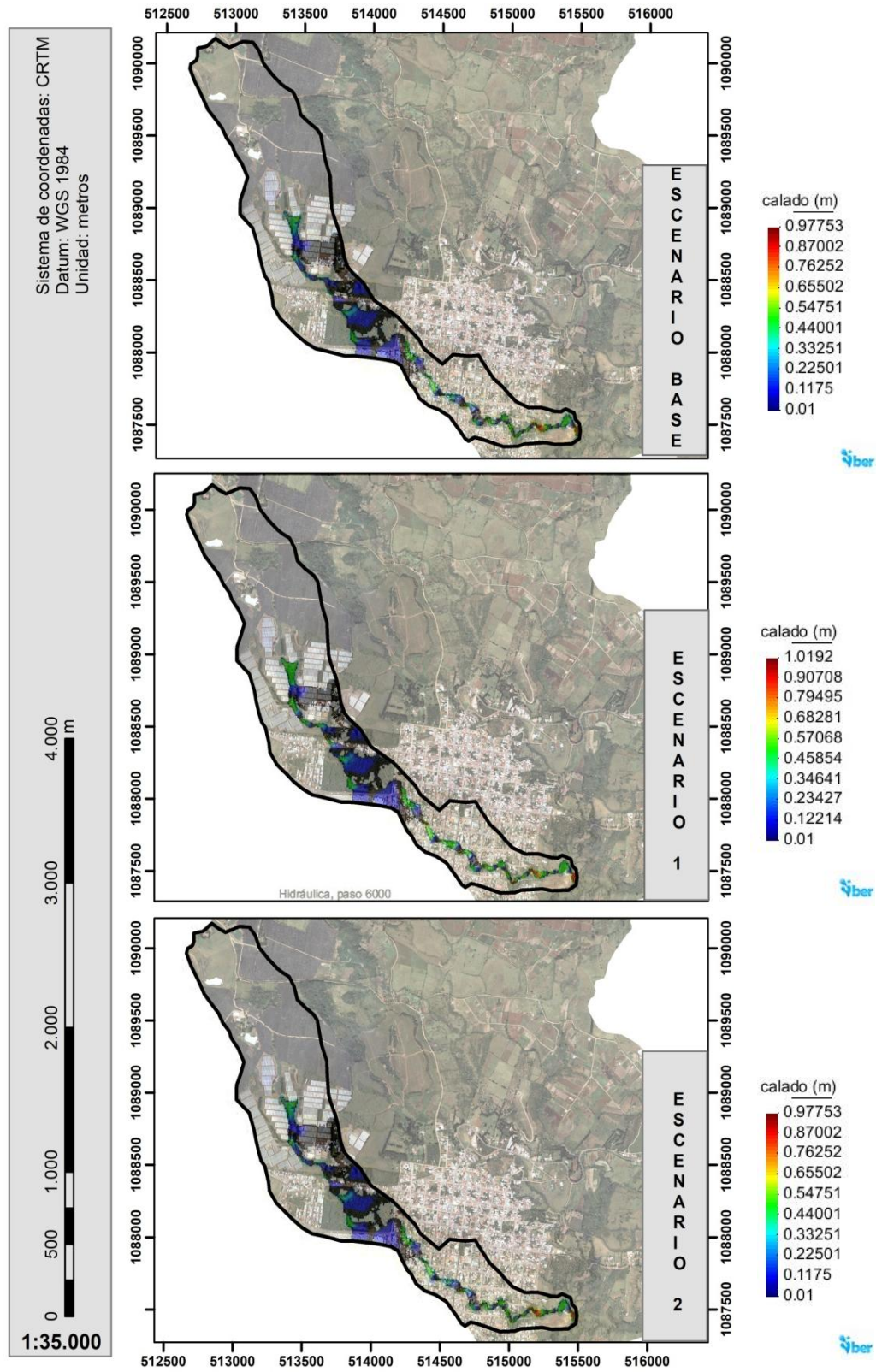


Figura 30. Modelado del caudal, sección micro 12, quebrada Pollo

## XI. CONCLUSIONES

- ✓ Se obtuvo la caracterización morfométrica-biofísica de la subcuenca en general, así como por sección (alta, media y baja) y por cada una de las 22 microcuencas que la integran. Las formas de las microcuencas tienden a ser alargadas, principalmente en las secciones altas de la subcuenca, tendiendo a una forma más circular en las partes medias y bajas de la subcuenca. Los sistemas de drenaje de la parte alta de la cuenca poseen una estructura más compleja que la sección media y baja, por lo tanto, una respuesta más rápida a drenar el agua de escorrentía, mostrando un mayor potencial de generar altos volúmenes de escorrentía en el cauce en instantes. La pendiente de la subcuenca en general no parece ser un factor crítico, sin embargo, los valores mostrados sugieren que se debe tener cautela de las prácticas que se realicen en la zona, en especial de la sección alta y baja de la subcuenca. Los tiempos de concentración sugieren que las microcuencas poseen una respuesta muy rápida a la precipitación, generando altos volúmenes de escorrentía disponible en el cauce en menor tiempo. La subcuenca presenta una alta conflictividad de uso de la tierra en las AP, en especial en las zonas medias y bajas, por invasión, principalmente de actividades agrícolas y expansión urbana.
- ✓ Todas las secciones de la subcuenca presentan una vulnerabilidad a crecidas e inundaciones importante a considerar. La parte alta promueve el dinamismo y energía cinética de la escorrentía de la subcuenca, las partes medias reflejan una impermeabilidad importante, o bien, una homogeneidad del uso de la tierra (agrícola y urbano), que aumentan la posibilidad de desbordamientos y la sección baja sugiere una alta posibilidad de generar cuellos de botella de escorrentía (acumulamientos e inundaciones) por los tiempos de recorridos semejantes en todos sus cuadrantes. Determinándose que las zonas con mayor grado de vulnerabilidad a inundaciones se hallan en la sección baja de la subcuenca, en concreto en las microcuencas 11, 12, 13, 16 y 20, además del tramo del río Páez posterior a la catarata Los Novios y la desembocadura de la subcuenca (micro-0).

- ✓ Las IV urbanas ubicadas reflejaron un importante potencial para brindar servicios ecosistémicos, sin embargo, su contribución actual, respecto al área total de los centros urbanos (Cot y Paraíso), es prácticamente nula, dominado la infraestructura gris. Sugiriendo la necesidad de buscar alternativas de IV en los bordes de los centros urbanos, como los anillos verdes.
- ✓ Se definieron tres escenarios de IV a partir de un escenario base (IV presentes) integrado por las AP, uso de la tierra definido como cultivo permanente e IV urbanas presentes en la comunidad de Cot y Paraíso. La zonificación de IV determinadas reduciría en un 14% hasta un 5% de la escorrentía producida por las entradas de lluvia a la subcuenca. El efecto de las IV sobre la escorrentía del paisaje es más perceptible a escalas menores, es decir, el efecto de las IV sobre la escorrentía es porcentualmente más significativo a escala de microcuencas que a escala de subcuenca.
- ✓ La propuesta de IV se hace más restrictiva conforme se bajan escalones en las secciones de la subcuenca, debido a que el uso de la tierra es más limitante para la implementación de IV.
- ✓ La zonificación de la IV propuestas permitiría reducir la escorrentía y los niveles del caudal máximo de las microcuencas y la subcuenca en general. Las microcuencas más vulnerables, es decir, las microcuencas 11, 12 y 0, se reducirían hasta un 44%, 6% y 14%, respectivamente, generando una menor vulnerabilidad a inundaciones.
- ✓ La metodología propuesta muestra una zonificación de la IV que genera una reducción de la escorrentía y los niveles del caudal máximo de las microcuencas y la subcuenca en general, mitigando la vulnerabilidad a inundaciones.
- ✓ Las IV han adquirido una función importante en las estrategias de gestión de pluviales, al disminuir la escorrentía y mitigar la vulnerabilidad a inundaciones, además de mejorar la capacidad de retención de precipitaciones en la cuenca.

## **XII. RECOMENDACIONES**

- ✓ Debido a la alta densificación urbana presente en los centros urbanos de la subcuenca se recomienda orientar las IV a la formación de un anillo verde en el borde de los centros urbanos, también es recomendable optar por IV a lo interno de los centros urbanos, que integren vegetación con otras estructuras como pavimentos porosos, así como techos verdes y demás que permiten expandir las IV sin ocupar espacios extra dentro del centro urbano.
- ✓ Se recomienda realizar estudios a pequeña escala sobre el potencial que poseen diferentes tipos de IV para reducir el volumen de escorrentía en el paisaje. Generando coeficientes que se puedan utilizar en programas de modelado hidrológico, para permitir una planificación y modelado más preciso del efecto de las IV sobre la hidrología del paisaje.
- ✓ También es importante aplicar la metodología propuesta en este estudio en otras cuencas, en especial aquellas las cuales presenten una mayor incidencia de eventos hidrometeorológicos, con tal de comparar resultados, validar y retroalimentar la metodología (para refinar la zonificación de IV)
- ✓ Es importante divulgar el concepto IV y la presente propuesta, a nivel de institucionalidad de los municipios, comisiones y otras organizaciones involucradas, con la finalidad de concretar un proyecto piloto que funcione como modelo de estudio y ejemplo de desarrollo sostenible y adaptativos al CC.

Pese a que dentro de los objetivos de la tesis no se figura la elaboración de una estrategia de divulgación de la propuesta (dado la complejidad y requerimientos de tiempo y recursos que ello implica), se identificaron algunos stakeholders claves que podrían propiciar un primer enlace para la divulgación de la propuesta, atendiendo, en parte, la observación del evaluador designado por Comité Evaluador de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

La Comisión de Recurso Hídrico del Consejo Cantonal de Coordinación Institucional del Cantón de Cartago (CCCI-RH) está conformada por el Área Rectora de Salud Cartago - Ministerio de Salud, oficina de Cartago del SINAC - MINAE, Municipalidad de Cartago, SENARA, Escuela de Ciencias Ambientales - UNA, Tecnológico de Costa Rica Escuela Agrícola y Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados AyA. Esta interinstitucionalidad lo hace un stakeholders muy prometedor, al favorecer la divulgación de la propuesta a otros entes de interés, conectados con las instituciones que conforman la comisión. Otro punto a favor de este stakeholders es el enlace ya establecido con dos miembros de la comisión, María Álvarez e Isabel Guzmán, ambas lectoras de la presente tesis. Además de tener experiencias pasadas con la presentación de otros proyectos propios a dicha comisión, lo cual facilita el diálogo y la posibilidad de abrir espacios de presentación del proyecto.

La Comisión para el Manejo y la Recuperación de la Subcuenca del Río Birris (COBIRRIS), es otra comisión interinstitucional, conformada por el SINAC-MINAET, MAG, MEP (Escuela Guillermo Rodríguez Aguilar), Ministerio de Salud, ICE, JASEC, UNED, UCR, ASADAS (Cot, Santa Rosa, Cipresses, Paso Ancho y Buena Vista), AyA, EKEAU S.A., COOPEBAIRES R.L. y las municipalidades de Alvarado, Paraíso y Oreamuno. Igual a la comisión anterior, el carácter interinstitucional favorece caminos de divulgación, además la misma trabaja en el marco de la COMCURE, lo cual favorece a que otras subcuencas pertenecientes a la gran cuenca del río Reventazón tomen en consideración la propuesta planteada.

Además de los stakeholders es importante considerar otras iniciativas que podrían promover la divulgación del proyecto e inclusive otorgar un mayor peso a este, para su consideración en las decisiones y estrategias municipales y nacionales. A nivel nacional está el proceso de REDD+, una presentación realizada en mayo del 2018 por la coordinadora técnica de la estrategia REDD+, María Elena Herrera Ugalde, mencionó que dentro de las acciones innovadoras para la mejora de reservas de carbono están la creación de IV para reducir los riesgos por desastres naturales, inclusión del componente forestal en sistemas agropecuarios y restauración y rehabilitación de hábitats. A nivel local, por ejemplo, el municipio de Oreamuno gana por tercer año consecutivo el galardón de

programa Bandera Azul Ecológica, además de otras iniciativas como “Programa Mi Parque Seguro”, todas las cuales reflejan el interés del gobierno local por el desarrollo sostenible, por lo tanto, la presencia de un ambiente favorable para la divulgación de proyectos de esta índole.

### **XIII. ALCANCES DE LA TESIS**

1. Publicación del artículo "MORFOMETRÍA DE LA SUBCUENCA DEL RIO TOYOGRES, CARTAGO, COSTA RICA", en la revista Geográfica de América Central (N° 60) del primer semestre 2018.
2. Presentación de la ponencia titulada "ZONIFICACIÓN DEL CONFLICTO DE USO DE LA TIERRA EN LAS ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LA RED DE DRENAJES DE LA CUENCA DEL RÍO PÁEZ, CARTAGO, COSTA RICA", en el I Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar.
3. Artículo sometido a revisión (05/06/2018) para publicar en la revista Geográfica de América Central, denominado "ZONIFICACIÓN DEL CONFLICTO DE USO DE LA TIERRA EN LAS ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LA RED DE DRENAJES DE LA CUENCA DEL RÍO PÁEZ, CARTAGO, COSTA RICA".
4. Artículo en preparación sobre la morfometría de la subcuenca del rio Paéz.

## XIV. REFERENCIAS

- Abhas, K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Ciudades e Inundaciones: Guía para la Gestión Integrada del Riesgo (Resumen para hacedores de políticas)*. Washington: International Bank for Reconstruction and Development /International Development Association.
- Abrahams, A. (1984). Channel networks: a geomorphological perspective. *Water Resour Res.* 20., 161–168.
- Agarwal, C. (1998). Study of drainage pattern through aerial data in Naugarh area of Varanasi district, U.P. *J Indian Soc Remote Sens.* 26., 169–175.
- Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: The spatial dimension. *IWA-Novotny*, 21(15), 2670283.
- Ahmad, S., Ahmad, S., & Rashid, I. (2012). Geoinformatics for assessing the morphometric control on hydrological response at watershed scale in the Upper Indus Basin. *J. Earth Syst. Sci.*, 121(3), 659-686.
- Ajibade, L., Ifabiyi, I., Iroye, K., & Ogunteru, S. (2010). Morphometric Analysis of Ogunpa and Ogbere Drainage Basins, Ibadan, Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 3(1), 13-19.
- Alfaro, L. (3 de Marzo de 2011). *Impacto económico de los desastres naturales en Costa Rica*. Recuperado el 2 de Mayo de 2017, de Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica: <http://www.mideplan.go.cr/147-rendicion-de-cuentas1/articulos-de-opinion2/850-impacto-economico-de-los-desastres-naturales-en-costa-rica>
- Algeet-Abarquero, N., Marchamalo, M., Bonatti, J., Fernandez-Moya, J., & Moussa, R. (2015). Implications of land use change on runoff generation at the plot scale in the humid tropics of Costa Rica. *CATENA*, 135, 262-270.
- Ambientico. (2013). Biodiversidad en la ciudad costarricense. *Ambientico*, 87.
- Apan, A., Raine, S., & Paterson, M. (2002). Mapping and analysis of changes in the riparian landscape structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 59(1), 43-57.
- Arce, R. (2004). *Resumen Diagnostico Cuenca Reventazón*. San José, CR.: DIPECHO, CNE, UNICEF, RNTC, y ECHO.
- Asadian, Y., & Weiler, M. (2009). A new approach in measuring rainfall interception by urban trees in coastal British Columbia. *Water Quality Research Journal of Canada*, 44, 16–25.
- Ayala, R., Páez, G., & Araque, F. (2007). Análisis geomorfológico de la microcuenca El Guayabal a propósito de la ocurrencia de las lluvias excepcionales de febrero de 2005. Cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 48(1), 59-82.
- Bannister, J., & Pyttel, P. (2010). Silvicultura cercana a lo natural (SCN): ¿Una nueva visión para el sector forestal chileno? *Bosque Nativo* , 46, 26-34.
- Bartens, J., Day, S. D., Harris, J. R., Dove, J. E., & Wynn, T. M. (2008). Can urban treeroots improve infiltration through compacted subsoils for stormwatermanagement? *Journal of Environmental Quality*, 37, 2048–2057.
- Benedict, M., & McMahon, E. (2006). Green Infrastructure: Small Conservation for The 21st Century. . *Sprawl watch clearinghouse monograph series*. Washington, D.C. , 32.
- Benegas, L., Istedt, U., Roupsard, O., Jones, J., & Malmer, A. (2014). Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 185-196.

- Benito, V. (2014). Los Corredores Verdes; su importancia en la estructuración ambiental y urbanística en entornos metropolitanos. El caso práctico del Suroeste Metropolitano de Madrid. *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, (págs. 293-301). Alicate.
- Berland, A., & Hopton, M. E. (2014). Comparing street tree assemblages and associated stormwater benefits among communities in metropolitan Cincinnati, Ohio, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 734–741. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.06.004>
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162(Supplement C), 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Bermúdez, M. (1980). *Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (Coffea arabica L.), Poro (Erythrina poeppigiana (Walpers), O. F. Cook) y Laurel (Cordia alliodora (R. & P.) Cham.) en Turrialba, CR*. Turrialba, C.R.: CATIE y UCR. Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae.
- Bettini, V. (1998). *Elementos de ecología urbana*. Valladolid: Editorial Trotta.
- Bonan, G. (2002). *Ecological climatology: concepts and applications*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Botey, S. (2013). Bases para la creación de una silvicultura genuinamente mediterránea. *VI Congreso Forestal Español: "Motes servicio y desarrollo rural"*, (págs. 1-18). Victoria.
- Brauman, K., Freyberg, D., & Daily, G. (2012). Potential evapotranspiration from forest and pasture in the tropics: A case study in Kona, Hawai‘i. *Journal of Hydrology*, 440-441, 52-61.
- Brody, S. D., Kim, H., & Gunn, J. (2013). Examining the impacts of development patterns on flooding on the Gulf of Mexico coast. *Urban Studies*, 50(4), 1-18.
- Brody, S., & Highfield, W. (2013). Open space protection and flood mitigation: A national study. *Land Use Policy*, 32, 89-95.
- Brody, S., Gillis-Peacock, W., & Gunn, J. (2012). Ecological indicators of flood risk along the Gulf of Mexico. *Ecological Indicators*, 18, 493-500.
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework* (Vol. 38).
- Bruijnzeel, L., Bonell, M., Gilmour, D., & Lamb, D. (2005). Conclusion Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view. *Forests, Water and People in the Humid Tropics*, 906-925.
- Calder, I., Hofer, T., Vermont, S., & Warren, P. (2007). Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva*, 58, 3-10.
- Calvo-Alvarado, J., Jiménez-Rodríguez, C., & Saa-Quintana, M. (2012). Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un Bosque húmedo Tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), 1-9.
- Castro, S. (2005). Evaluación de un índice para valorar las áreas verdes urbanas: su aplicación y análisis en la localidad de Barrio Dent y Altos del Escalante con una perspectiva geográfica. *Rev. Reflexiones*, 84(1), 107-125.
- Catovsky, S., Holbrook, N. M., & Bazzaz, F. A. (2002). Coupling whole-tree transpiration and canopy photosynthesis in coniferous and broad-leaved tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 295–309.
- Center for Neighborhood Technology. (2010). *The value of green infrastructure: A guide to recognizing its economic, environmental and social benefits*. Retrieved December 20, 2016 from <http://www.cnt.org/sites/default/files/publications/CNT Value-of-Green-Infrastructure.pdf>

- Charles, M. (1998). *Medición y estimación de los componentes de la intercepción en cuatro comunidades representativas del nordeste de México*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Tesis a optar por el grado de Maestría en ciencias forestales.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. Suarez R., Ed.) Bogotá: McGraw-Hill.
- Cleugh, H. A., Bui, E., Simon, D., Xi, J., & Mitchell, V. G. (2005). The impact of suburban design on water use and microclimate. In Proceedings of the MODSIM05.
- CNE. (2012). *Ordenamiento Territorial y la Gestión de Riesgo*. San José, CR.: Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible, Universidad de Costa Rica.
- CNE. (2014). *Gestión Municipal del Riesgo de Desastres: Normas y elementos básicos para su inclusión en el ordenamiento territorial, énfasis en Prevención, Control y Regulación Territorial*. (S. Mora Castro, M. d. Saborío Víquez, & J. Saborío Bejarano, Edits.) San José, CR: La Comisión, Sistemas Geoespaciales.
- Conejero, A. (2011). *Estudio del ecosistema urbano de San José: Protocolo de monitoreo de aves y naturalización del Parque La Sabana*. San José: (Proyecto final de la carrera de Ciencias Ambientales, UAB, INBiO).
- Coutu, G., & Vega, C. (2007). Impacts of land use changes on runoff generation in the east branch of the Brandywine Creek Watershed using a GIS-based hydrologic model. *Middle States Geographer*, 40, 142-149.
- Cruz-Romero, B., Gaspari, F., Rodríguez-Vagaría, A., & Carrillo-González, F. T.-L. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*.(64), 26-34.
- CRWA, 2009. Storms Water, Trees and Urban Environment.
- Cubero, C., & Carvajal, J. (2014). Distribución espacial de las inundaciones en costa rica, 10 años de sus efectos. *En Tomo a la Prevención*(15), 15-20.
- Dar, R., Chandra, R., & Romshoo, S. (2013). Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. *J Mt Sci.*, 10(1), 731–741.
- Daza, O., & Sanabria, R. (2008). Identificación de conflictos de uso de suelo en rondas hídricas: herramienta para manejo ambiental. Caso de estudio municipio de Paipa. *Perspectiva Geográfica*, 13, 13–26.
- Esquivel, A., & Valerio, L. (2013). *Propuesta de restauración forestal de las áreas de protección de los principales afluentes del Corredor Biológico*. Tesis Licenciatura en Restauración de Ecosistemas Forestales. Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia.
- Fallas, A. (2010). *Intervenciones basadas en la planificación y gestión territorial de los riesgos del agua y el medio ambiente con enfoque de multiculturalidad y género en el municipio de Oreamuno, Cartago, Costa Rica*. Guatemala: (Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Fang, X., Cleveland, T., Garcia, A., Thompson, D., & Malla, R. (2005). *Literature review on timing for hydrographs. Beaumont, Texas*. Beaumont, Texas: Department of Civil Engineering, College of Engineering, Lamar University. Disponible en <http://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/phase2/4696-1-lamar.pdf>.
- FAO. (2013). *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. Estudio FAO Montes N 172. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). *Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Turrialba, CR.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Área de Cuencas y Sistemas Agroforestales.
- Ferrando, F. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos: Flood Disasters. *Revista de Urbanismo*(12), 25-42.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs: WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12, 525–542.

- Forman, R., & Collinge, S. (1995). The "spatial solution" to conserving biodiversity in landscapes and regions. En R. DeGraaf, & R. Miller, *Conservation of fauna diversity in forested landscapes* (págs. 537-568). London, UK.: Chapman & Hall.
- Forman, R., & Godron, M. (1986). Landscape Ecology. United States of America. *Quinn-Woodbine, Inc.*, 619.
- Fox, D., Witz, E., Blanc, V., Soulie, C., Penalver-Navarro, M., & Dervieux, A. (2012). A case study of land cover change (1950-2003) and runoff in a Mediterranean catchment. *Applied Geography*, 32(2), 810-821.
- Fuentes, J. (2004). *Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro*. Instituto Nacional de Ecología.
- García, C. (2007). Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá D.C. *Revista Colombia Forestal*, 10(20), 127-147.
- García, D. (sf.). Estudio de la protección de la vegetación ante los flujos aguas de escorrentía en laderas naturales. *IV Congreso Forestal Español*. Madrid.
- García-Prats, A., Del Campo-García, A., & Molina, A. (2015). Evaluación de la recarga producida mediante manejo de una masa de *Pinus halepensis* con técnicas de silvicultura hidrológica. *Cuad. Soc. Esp. Cienc.*, 41, 195-210.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río sauce grande, Buenos Aires, Argentina. *Actas sétimo Congreso de Medio Ambiente AUGM* (pág. 25). La Plata, Buenos Aires: Universidad de la Plata, Cátedra Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Gill, S., Handley, J., Ennos, A., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115-133.
- Giordano, L. (2004). *Análise de um conjunto de procedimentos metodológicos para a delimitação de corredores verdes (greenways) ao longo de cursos fluviais*. Tesis de doctorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 162 p.
- González, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la pelidrosidad de crecidas. *Boletín AGE*, 38, 311-329.
- González, M. (1996). Impacto de la agricultura en los sistemas fluviales. Técnicas de restauración para la conservación del suelo y del agua. *Agricultura y sociedad*, 78, 211-236.
- González, M., Del-Campo-García, A., Bautista, I. L., Lull, C., García, A., & Francés, F. (2013). Efecto de la silvicultura hidrológica en una masa natural de *Quercus ilex* ssp *ballota*. *VI Congreso Forestal Español* (pág. 9). Victoria-Gasteiz: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- González-Sosa, E., Braud, I., Becerril Piña, R., Mastachi Loza, C. A., Ramos Salinas, N. M., & Chávez, C. V. (2017). A methodology to quantify ecohydrological services of street trees. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 17(3), 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.06.004>
- Gordon, N., McMahon, T., Finlayson, B., Gippel, C., & Nathan, R. (2004). *Stream hydrology: An introduction for ecologists* (2 ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Gregoire, B. G., & Clausen, J. C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecological Engineering*, 37(6), 963–969.
- Guerrero, M., & Culos, G. (2007). Indicadores ambientales en la gestión de espacios verdes. El parque Cerro La Movediza. Tandil, Argentina. *Revista Espacios*, 28(1), 57-73.
- Günter, S., Weber, M., Stimm, B., & Mosandl, R. (2012). Linking tropical silviculture to sustainable forest management. *Bois et Forêts des Tropiques*, 314(4), 25-39.
- Gupta, A., & Usharani, L. (2009). Rainfall partitioning in a tropical forest of Manipur, North East India. *Tropical Ecology*, 50(2), 355-358.

- Haines-Young, R., Potschin, M., & Kienast, F. (2012). Indicators of ecosystem service potential at European scales: Mapping marginal changes and trade-offs. *Ecological Indicators*, 21, 39-53.
- Hamin, E., & Gurrán, N. (2009). Urban Form and Climate Change: Balancing Adaptation and Mitigation in the US and Australia. *Habitat International*, 33(3), 238- 245.
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 43, 516–529. Doi:10.1007/s13280-014-0510-2.
- Hernández, A. (2013). *Manual de diseño bioclimático urbano. Recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*. (A. Goncalves, A. Castro, & M. Feliciano, Edits.) Bragança, Portugal: Instituto Politécnico de Bragança.
- Highfield, W. (2012). Section 404 permitting in coastal Texas: A longitudinal analysis of the relationship between peak streamflow and wetland alteration. *Environmental Management*, 49, 892-901.
- Horton, R. (1945). Erosion development of streams and their drainage basins: Hydrophysical application of quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Arnerica*, 56, 281-370.
- Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo*. Barcelona, España: Editorial Reverte. Recuperado de <https://goo.gl/Guh1bT>.
- IGAC, & Corpoica. (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*. Bogotá, D.C.
- INEC. (2016). (a) *Clasificación Geográfica con fines Estadísticos*. San José, CR. Disponible en <http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/meinstitucionalmcgfcfecr.pdf>.
- INEC. (2016). (b) *Estadísticas Vitales 2015: Población, nacimientos defunciones y matrimonios*. San Jose, CR. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/replacestadvitales2015.pdf>.
- Inkiläinen, E. N. M., McHale, M. R., Blank, G. B., James, A. L., & Nikinmaa, E. (2013). The role of the residential urban forest in regulating throughfall: A case study in Raleigh, North Carolina, USA. *Landscape and Urban Planning*, 119, 91–103.
- Jiménez, F. (2001). *Conceptos, estrategias y diagnósticos en el mapeo de la cuencas hidrográficas*. Turrialba, CR.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Jonkman, S., & Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, 29(1), 75–97.
- Jurczak, T., Wagner, I., Kaczowski, Z., Szklarek, S., & Zalewski, M. (2018). Hybrid system for the purification of street stormwater runoff supplying urban recreation reservoirs. *Ecological Engineering*, 110(Supplement C), 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.019>
- Karalis, S., Karymbalis, E., Valkanou, K., Chalkias, C., Katsafados, P., Kalogeropoulos, K., . . . Bofilios, A. (2014). Assessment of the Relationships among Catchments' Morphometric Parameters and Hydrologic Indices. *International Journal of Geosciences*, 5, 1571-1583.
- Kauffman, G., & Brant, T. (2000). The Role of Impervious Cover as a Watershed-Based Zoning Tool to Protect Water Quality in the Christina River Basin of Delaware, Pennsylvania, and Maryland. *Water Res. Agency*.
- Kirnbauer, M.C., Baetz, B.W., Kenney, W.A., 2013. Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and underutilized urban land parcels. *Urban Forestry Urban Green*. 12 (3), 401–407.
- Kjelgren, R., & Montague, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 32, 35–41.
- Koch, P.R., 2005. A Milwaukee model for LID hydrologic analysis. In: Moglen, G.E. (Ed.), *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts Part of Engineering, Ecological, and Economic Challenges, Watershed 2005*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, July 19–22, 2005, Williamsburg, Virginia.

- Krcho, J., Haverlík, I., & Krcho, J. (1973). *Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory*. Bratislava: Slovak Pedagogical Publishers.
- Krushensky, R. (1972). *Geology of the Istaru Quadrangle Costa Rica*. Washington.: United States Department of the Interior. Geological Survey.
- Kumar-Rai, P., Narayan-Mishra, V., & Mohan, K. (2017). A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 9-20.
- Ledezma, A. (2009). (a) *Diagnóstico Inicial de la Situación de los Residuos Sólidos en la Municipalidad de Oreamuno*. Cartago, CR.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).
- Ledezma, A. (2009). (b) *Diagnóstico Inicial de la Situación de los Residuos Sólidos en la Municipalidad de Paraiso*. Cartago, CR.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).
- Lee, J. Y., Lee, M. J., & Han, M. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*, 152(Supplement C), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.028>
- Lehmann, I., Mathey, J., Röbber, S., Bräuer, A., & Goldberg, V. (2014). Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects. *Ecological Indicators*, 42(Supplement C), 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.036>
- Leitao, A., Miller, J., Ahern, J., & McGarigal, K. (2006). *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*. Recuperado de <https://goo.gl/mhNUME> .
- Ley N° 8488. (22 de 11 de 2005). Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo. Diario Oficial La Gaceta de Costa Rica
- Li, F., Wang, R., Paulussen, J., & Liu, X. (2005). Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 72, 325-336.
- Liu, W., Chen, W., & Peng, C. (2014). Assessing the effectiveness of green infrastructure on urban flooding reduction: A community scale study. *Ecological Modelling*, 291, 6-14.
- Locatelli, B., Kanninen, M., Brockhaus, M., Colfer, C., Murdiyarso, D., & Santoso, H. (2009). *Ante un futuro incierto: cómo se pueden adaptar los bosques y las comunidades al cambio*. (C. p. (CIFOR), Ed.) Bogor, Indonesia.: Perspectivas forestales.
- Lundy, L., & Wade, R. (2011). Integrating Sciences to Sustain Urban Ecosystem Services. *Progress in Physical Geography*, 35(50), 653-669.
- Malagnoux, M., E.H., S., & Atzmon, N. (2007). Bosques, árboles y agua en las tierras áridas: un equilibrio delicado. *Unasylva*, 58, 24-29
- Mell, I. (2008). Green Infrastructure: concepts and planning. *FORUM Ejournal*, 69-80.
- Méndez, W. (2016). Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo “El Ávila” (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidrogeomorfológico. *Investigaciones Geográficas*, 91, 25-42.
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226.
- Mintegui, J., Robredo, J., De Gonzalo, C., & Huelin, P. (2009). La incidencia de las masas arboladas en los ciclos del agua y de los sedimentos en la cuenca hidrográfica: su repercusión en la ordenación y restauración de la misma. *Quinto Congreso Forestal Español* (págs. 2-10). Madrid: Sociedad Española de Ciencias Forestales - Junta de Castilla y León.
- Molina, M. (2007). Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área Metropolitana del Gran Santiago sobre la generación y comportamiento de microislas de calor.

- Memoria para optar al título profesional de geógrafo* (pág. 118). Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.
- Montes, C. (2014). La silvicultura como elemento crítico para la sostenibilidad y el manejo del bosque. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 147-153.
- Morera, C., Pinto, J., & Romero, M. (2007). Paisajes procesos de fragmentación y redes ecológicas aproximación conceptual. *Corredores Biológicos: Acercamiento conceptual y experiencia en América*. Imprenta Nacional. San Jose, CR., 11-47.
- Nag, S. (1998). Morphometric Analysis Using Remote Sensing Techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengal. *Jour of the Indian Soc. Remote Sensing*, 26(1), 69-76.
- Ndubisi, F. (2002). *Ecological Planning: A Historical and Comparative Synthesis*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. Recuperado de <https://goo.gl/VT8159>.
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67-79.
- Olaya, V. (2004). *Hidrología computacional y modelos digitales del terreno: teoría, practica y filosófica de una nueva forma de análisis hidrológico*.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR). Ginebra, Suiza. Disponible en [http://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologySpanish.pdf](http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf)
- Pareta, K. y Pareta, U. (2011). Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) Data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 248-269.
- Pataki, D. E., McCarthy, H. R., Litvak, E., & Pincetl, S. (2011). Transpiration of urbanforests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, 21,661–677.
- Patton, P. (1988). Drainage basin morphometry and floods. En V. Baker, R. Kochel, & P. PC., *Flood geomorphology* (págs. 51–65). Wiley, New York.
- PEN (Programa Estado de la Nación en Desarrollo Sostenible). (2015). *Vigésimo primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, Costa Rica*. San José : Prolitsa S.A.
- Peng, J., Chen, X., Liu, Y., Lu, H., & Hu, X. (2016). Spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Applied Geography*, 74, 170-181.
- Peru. (18 de Octubre de 2017). *Manual de hidrología, hidráulica y drenajes*. Obtenido de Ministerio de transporte y comunicaciones.: [https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Hidrolog%C3%ADa,%20Hidr%C3%A1ulica%20y%20Drenaje.pdf](https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Hidrolog%C3%ADa,%20Hidr%C3%A1ulica%20y%20Drenaje.pdf)
- Pique, M., & Vericat, P. (2014). La Silvicultura y la Planificación forestal: nuevos retos, nuevos enfoques. *Ambienta*, 108, 4-19.
- PREVDA, Nacional, U. G., & Europea, U. (2008). *Plan de Cuenca del Río Reventazón-Parismina 2008-2010*. San José, CR.
- PRUGAM, & UE. (2005). *Cartografía: Cuadrante Sur-Este*. San José, CR.: Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos.
- ProDUS (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible). (2016). *Producto # 5: Plan de uso del suelo para las faldas del Volcan Irazú*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica (UCR), Banco Interamericano de Desarrollo (BID).Puettmann, K., Coates, D., & Messier, C. (2016). *Crítica de la Silvicultura: El manejo de la complejidad*. Madrid, España: Asociación Cultural y Científica Iberoamericana (ACCI).

- Ramírez, C. (2016). *Los patrones de paisaje urbano en Medellín (Colombia): su estructura con espacios para la naturaleza*. Medellín, Colombia.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Trabajo de graduación a optar por el grado de Magister en Estudios Urbano.
- Reid, K.D., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., MacDonald, L., 1999. Runoff and erosion in a piñon-juniper woodland: influence of vegetation patches. *Soil Sci. Soc. Am. J.*63, 1869–1879.a
- Retana, J. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*, 44(2), 5-16.
- Reyes, W. (2003). *Vulnerabilidad a desastres naturales, determinación de áreas críticas y propuesta de mitigación en la microcuenca del río Talgua, Catacamas, Honduras*. Turrialba, C.R.: CATIE. Tesis para optar por el grado de Magister Scientiae.
- Roberts, A. (2001). Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First break*, 19, 85-100.
- Rodríguez, H. (2010). Ciencias Sociales y Gestión Ambiental: El caso del desarrollo forestal urbano en Costa Rica. *Reflexiones*, 89(2), 13-25.
- Rojas, N. (2011). *Estudios de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica: Cuenca río Reventazón*. MINAET (Ministerio Nacional de Ambiente y Energía), IMN (Instituto Meteorológico Nacional) y PNUD-Costa Rica (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo)).
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Revista eure*, 31(94), 97-118.
- Romero, M., & López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: Revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía (Física)*(12), 47-62.
- Roy, S., Byrne, J., & Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 351–363. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>
- Saavedra, J. (2001). *Planificación Ambiental de los Recursos Forestales en la Región de la Araucanía, Chile. Definición de las Unidades Homogéneas de Gestión*. Madrid: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Sánchez, O., & Navarrete, G. (2017). La experiencia de Costa Rica en el pago por servicios ambientales: 20 años de lecciones aprendidas. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)* , 51 (2),
- Sánchez, S. (2010). *Caracterización morfométrica y simulación del balance de la cuenca "Tres Valles, S.L.P"* . México: (Postgrado de Hidrociencias). Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Sanchún, A., Botero, R., Morera-Beita, A., Obando, G., & Ricardo, O. (2016). *Restauración funcional del paisaje rural: manual de técnicas*. UICN. San José, Costa Rica. XIV. 436 p.
- Schueler, T. (1995). *Site Planning for Urban Stream Protection*. Washington D.C: Metropolitan Washington Council of Government.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2015). *Inundaciones urbanas y cambio climático: Recomendaciones para la gestión*. (A. Consultora, Ed.) Buenos Aires, Argentina: Gráfica Buschi.
- SEPSA. (2015). *Plan Regional de Desarrollo Agropecuario y Rural Central Oriental 2015-2018*. Comité Sectorial Agropecuario Regional Central Oriental.
- Shary, P., Sharaya, L., & Mitusov, A. (2005). The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 28, 81-101.
- Sheridan, J., Lowrance, R., & Bosch, D. (1999). Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers. *Transactions of the ASAE*, 42(1), 55-64.
- Sist, P., Gourlet-Fleury, S., & Nasi, R. (2011). IUFRO international conference report: What future is there for tropical forest silviculture? *Bois et Forêts des Tropiques*, 310(4), 3-9.

- Sjobohm, L. (2008). *Informe técnico DPM-INF-1927-2008: "Valoración de comunidad por inundación y erosión de río Ujarrás, Paraíso, Cartago"*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.
- Smith, K. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Jour. Science*, 248, 655-668.
- Snehal, B. (2013). Morphometric Analysis with Reference to Hydrogeological Repercussion on Domri River Sub-basin of Sindphana River Basin, Maharashtra, India. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 1(1), 29-35.
- Solano, N. (2002). *Conservación de suelos en microcuencas Paez-Tatisca. I Congreso Agricultura Conservacionista*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017, de [http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/f08-8080\\_inicio.html#1193](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/f08-8080_inicio.html#1193)
- Sreedevi, P., Owal, S., Khan, H., & Ahmed, S. (2009). Morphometric analysis of a Watershed of South India using SRTM Data and GIS. *Journal Geological Society of India*, 73, 543-552.
- Srinivasa-Vittala, S., Govindaiah, S., & Honne-Gowda, H. (2004). Morphometric analysis of sub-watersheds in the Pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33(4), 351-362.
- Stadtmuller, T. (1994). *Impacto Hidrológico el Manejo Forestal de Bosques Naturales Tropicales: medidas para mitigarlo - Una revisión bibliográfica*. Turrialba, C.R.: CATIE. Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales.
- Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Tans. Am. Geophys. Union*, 38, 913-920.
- Strahler, A. (1964). Geology. Part II. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. Chow, *Handbook of Applied Hydrology* (págs. 439-476). New York: McGraw- Hill.
- Tabacchi, E., Planty-Tabacchi, A., & Decamps, O. (1990). Continuity and discontinuity of the riparian vegetation along a fluvial corridor. *Landscape Ecology*, 1(5), 9-20.
- Tencio, R. (2013). *Información General de la Región Central Oriental*. San Jose, CR.: Ministerio de Ganadería y Agricultura (MAG).
- Trejos, N. (2011). El Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas como estrategia de gestión territorial para la adaptación al cambio climático en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. En A. d. UNESCO., *Memorias del Segundo Simposio Internacional Construyendo Caminos de Conocimiento para un Futuro con Sostenibilidad Hídrica, Panamá, República de Panamá* (págs. 62-67.). Panamá: Punto Gráfico.
- Turner, M. (1989). Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20(1), 171-197.
- Umana, B. (2014). *Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS*. Cartago, C.R.: Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Proyecto de Graduación para optar por el grado de Lic. en Ing. en Construcción.
- V. Pouyat, R., Pataki, D., Belt, K., Groffman, P., Hom, J., & Band, L. (2007). *Effects of Urban Land-Use Change on Biogeochemical Cycles*. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_5).
- Vallejos, S., Esquivel, L., & Hidalgo, M. (2012). *Histórico de desastres en Costa Rica (Febrero 1723 - Setiembre 2012)*. San José, CR.: CNE (Comisión Nacional de Emergencias).
- Van Stan, J. T., II, Levia, D. F., Jr., & Jenkins, R. B. (2015). Forest canopy interception loss across temporal scales: Implications for urban greening initiatives. *The Professional Geographer*, 67, 41-51.
- Vigiak, O., Ribolzi, O., Pierret, A., Valentin, C., Sengtaheuanghoung, O., & Noble, A. (2007). Filtrado de los agentes contaminantes del agua por la vegetación ribereña: comparación del bambú con las pasturas nativas y el arroz en una cuenca en la República Democrática Popular Lao. *Unasyuva*, 58, 11-16.

- Vignola, R., Otarola, M., Majano, A., & Kilian, B. (2014). *Metodología para la evaluación del entorno político, socioeconómico y ambiental para un programa de crecimiento verde e inclusivo: Estudio de caso en paisajes productivos de Costa Rica*. San José: CATIE, INCAE y Banco Mundial.
- Villavazo, P., Corona, J., & García, S. (2002). Urbano-rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. *Revista de información y análisis*, 20, 17-24.
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. San Jose, CR.: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Vogel, C., & O'Brien, K. (2004). Vulnerability and Global Environmental Change: Rhetoric and Reality. *AVISO*, 13, 1-7.
- Walsh, C., Fletcher, T., & Ladson, A. (2005). Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream. *J N Am Benthol Soc.*, 24, 690–705.
- Walsh, C., Roy, A., Feminella, J., Conttingham, P., Groffman, P., & Morgan, R. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J N Am Benthol Soc.*, 24, 706–223.
- Wang, J., Endreny, T. A., & Nowak, D. J. (2008). Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. *Journal of the American Water Resources Association*, 44 (1), 75–85.
- Whitford, V., Ennos, A.R., Handley, J.F., 2001. City form and natural processes – indicators for the ecological performance of urban areas and their applications to Mersyside, UK. *Landsc. Urban Plan.* 57, 91– 103.
- Wong, G. K. L., & Jim, C. Y. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecological Engineering*, 70(Supplement C), 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.025>
- Woo, H., & Park, Y. (2016). Urban green infrastructure and local flooding: The impact of landscape patterns on peak runoff in four Texas MSAs. *Applied Geography*, 77, 72-81
- Xiao, Q., & McPherson, E. G. (2011). Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystems*, 14, 755–769.
- Xiao, Q., & McPherson, E. G. (2016). Surface water storage capacity of twenty tree species in Davis, California. *Journal of Environmental Quality*, 45, 188–198.
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Simpson, J. R., & Ustin, S. L. (1998). Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 24, 235–244.
- Xiao, Q., McPherson, E., 2003. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosyst.* 6, 291–302.
- Yang, X., You, X., Ji, M., & Nima, C. (2013). Influence factors and prediction of stormwater runoff of urban green space in Tianjin, China: Laboratory experiment and quantitative theory model. *Water Science & Technology*, 67(4), 869-876.
- Yao, L., Chen, L., Wei, W., & Sun, R. (2015). Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(2), 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.02.014>
- Zăvoianu, I. (1985). *Morphometry of Drainage Basins. Developments in Water Science* 20. New York: Elsevier.
- Zevenbergen, L., & Thorne, C. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.

- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C., Zhang, J., 2012. The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: a case study in Beijing, China. *J. Environ. Manage.* 100, 65–71.
- Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., Liu, J. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landscape and Urban Planning*, 144(Supplement C), 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>
- Zhin-Bin, H., Jun-Jun, Y., Jun, D., Hu, L., & Xue-Xiang, C. (2014). Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 188, 58-63.
- Zimmermann, B., Papritz, A., & Elsenbeer, H. (2010). Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest–pasture–forest transitions. *Geoderma*, 159, 209-215.
- Zimmermann, E., & Bracalenti, L. (2014). Reduccion de riesgos de inundacion urbana mediante icrementos de areas verdes. *IV Taleer de Regionalizacion de Precipitaciones Maximas*. Tucuman
- Zwartendijka, B., Van Meervelda, H., GhimirebL, C., Buijnzeelc, A., Ravelonad, M., & Jonese, J. (2017). Rebuilding soil hydrological functioning after swidden agriculture in eastern Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 101-111.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Número de curva “N” para complejos hidrológicos de suelo cobertura (para condiciones de humedad antecedente II)

Uso de la tierra	Cobertura		Número de Curva			
	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
Descuidado, en descanso, sin cultivos	Surcos rectos	----	77	86	91	94
Cultivos	Surcos rectos	pobre	72	81	86	91
	Surcos rectos	buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	pobre	70	79	84	88
	Curvas de nivel	buena	65	75	82	86
	Curv de nivel y en terrazas	pobre	66	74	80	82
	Curv de nivel y en terrazas	buena	62	71	78	81
Pequeños granos	Surcos rectos	pobre	65	76	84	88
	Surcos rectos	buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	pobre	63	74	82	85
	Curvas de nivel	buena	61	73	81	84
	Curv de nivel y en terrazas	pobre	61	72	79	82
	Curv de nivel y en terrazas	buena	59	70	78	81
Sembríos cerrados, legumbres o sembríos en rotación	Surcos rectos	pobre	66	77	85	89
	Surcos rectos	buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	pobre	64	75	83	85
	Curvas de nivel	buena	55	69	78	83
	Curv de nivel y en terrazas	pobre	63	73	80	83
	Curv de nivel y en terrazas	buena	51	67	76	80
Pastizales o similares		pobre	68	79	86	89
		regular	49	69	79	84
		buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel	regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	buena	6	35	70	79
Pradera		buena	30	58	71	78
Bosques		pobre	45	66	77	83
		regular	36	60	73	79
		buena	25	55	70	77
		----	59	74	82	86
Patios		----	59	74	82	86
Caminos, incluyendo derecho de vía	Cieno	----	72	82	87	89
	Superficie firme	----	74	84	90	92

**Anexo 2.** Gasto unitario “q” ( $m^3/s/mm/km^2$ ), en función del tiempo de concentración ( $T_c$ ) en horas

$T_c$	$q$	$T_c$	$q$	$T_c$	$q$
0.1	0.337	1.0	0.158	8.0	0.039
0.2	0.300	1.5	0.120	10.0	0.034
0.3	0.271	2.0	0.100	12.0	0.030
0.4	0.246	2.5	0.086	14.0	0.027
0.5	0.226	3.0	0.076	16.0	0.025
0.6	0.208	4.0	0.063	18.0	0.023
0.7	0.195	5.0	0.054	20.0	0.021
0.8	0.190	6.0	0.048	22.0	0.020
0.9	0.168	7.0	0.043	24.0	0.019

**Anexo 3.** Árboles censadas en la comunidad de Cot y Paraíso, subcuenca río Páez

Nombre Científico	# individuo	Promedio	Mín	Máx	Suma	Promedio	Mín	Máx
		DAP (cm)	DAP (cm)	DAP (cm)	Area Copa (m2)	Area Copa (m2)	Area Copa (m2)	Area Copa (m2)
<i>Acnistus arborescens</i>	1	-	-	-	15.9	15.9	15.9	15.9
<i>Bahuinea purpurea</i>	13	16.5	15.9	17.0	71.2	5.5	0.8	12.9
<i>Brunfelsia spp.</i>	4	-	-	-	6.1	1.5	0.8	1.8
<i>Callistemon speciosus</i>	34	16.8	10.5	31.3	179.3	5.3	0.2	23.8
<i>Casimiroa edulis</i>	3	27.8	21.6	31.7	121.1	40.4	8.3	68.7
<i>Cassia grandis</i>	2	25.3	11.2	39.4	98.2	49.1	4.9	93.3
<i>Casuarina sp</i>	7	48.9	37.9	57.3	212.1	30.3	8.3	53.5
<i>Cedrela odorata</i>	1	11.0	11.0	11.0	3.1	3.1	3.1	3.1
<i>Ceiba sp.</i>	1	16.5	16.5	16.5	1.8	1.8	1.8	1.8
<i>Chrysalidocarpus lutescens</i>	21	-	-	-	101.2	4.8	0.8	12.6
<i>Citrus sp.</i>	3	14.7	10.5	18.8	22.6	7.5	0.4	12.6
<i>Cojoba arborea</i>	11	26.1	10.6	60.4	566.8	51.5	0.8	237.8
<i>Credela odorata</i>	2	27.7	18.1	37.3	278.5	139.3	28.3	250.2
<i>Croton dracon</i>	5	20.5	10.8	35.0	166.4	33.3	9.6	56.7
<i>Cupressus lusitanica</i>	14	16.0	10.2	20.5	67.1	4.8	0.4	12.6
<i>Delonix regia</i>	2	18.0	13.0	23.0	36.6	18.3	0.8	35.8
<i>Diphysa americana</i>	7	38.1	12.7	60.0	356.1	50.9	4.9	193.6
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	2	41.0	24.2	57.8	97.7	48.8	23.8	73.9
<i>Eriobotrya japonica</i>	9	15.2	10	23.1	70.4	7.8	1.2	23.8
<i>Eugenia uniflora</i>	2	13.5	13.5	13.5	10.1	5.0	0.4	9.6
<i>Ficus benjamina</i>	8	18.7	13.5	23.8	41.6	5.2	3.1	12.6
<i>Ficus sp.</i>	9	42.9	13.7	85.0	1103.4	122.6	19.6	254.5
<i>Inga sp.</i>	1	38.5	38.5	38.5	63.6	63.6	63.6	63.6
<i>Jacaranda caucana</i>	1	32.2	32.2	32.2	95.0	95.0	95.0	95.0
<i>Leucaena leucocephala</i>	6	12.9	12.5	13.2	9.9	1.7	0.2	5.1
<i>Mangifera indica</i>	2	14.5	14.5	14.5	12.5	6.2	4.2	8.3
<i>Moringa oleifera</i>	1	-	-	-	4.9	4.9	4.9	4.9
<i>Murraya paniculata</i>	1	-	-	-	7.1	7.1	7.1	7.1
<i>Myrcianthes fragans</i>	1	10.1	10.1	10.1	0.8	0.8	0.8	0.8

<i>Persea americana</i>	1	15.8	15.8	15.8	13.2	13.2	13.2	13.2
<i>Pourouma</i>	1	-	-	-	0.8	0.8	0.8	0.8
<i>Pourouma</i>	2	43.7	40.0	47.3	164.4	82.2	69.4	95.0
<i>Psidium friedrichsthalianum</i>	3	20.2	18.4	22.0	17.9	6.0	3.6	8.3
<i>Psidium guajava</i>	23	14.4	10.9	20.5	261.6	11.4	1.8	38.5
SAPOTACEAE	1	16.6	16.6	16.6	8.3	8.3	8.3	8.3
<i>Spatodea campanulatum</i>	1	74.0	74.0	74.0	130.7	130.7	130.7	130.7
<i>Syzygium paniculatum</i>	7	12.1	10.1	14.3	17.9	2.6	0.8	4.3
<i>Tabebuia ochracea</i>	6	-	-	-	24.9	4.1	0.8	7.1
<i>Tabebuia rosea</i>	1	-	-	-	12.6	12.6	12.6	12.6
<i>Tecoma stans</i>	1	-	-	-	3.5	3.5	3.5	3.5
<i>Terminalia catappa</i>	5	17.7	16.4	19.9	19.1	3.8	0.4	7.5
<i>Thevetia peruviana</i>	3	13.7	12.9	14.3	9.4	3.1	3.1	3.1
TILIACEAE	1	19.9	19.9	19.9	33.2	33.2	33.2	33.2
<i>Trichillia havanensis</i>	5	-	-	-	7.6	1.5	0.4	2.4
<i>Trichillia sp.</i>	4	22.7	22.7	22.7	72.5	18.1	0.8	70.1
<i>Triquilia sp.</i>	2	-	-	-	1.6	0.8	0.8	0.8
<i>Ulmus mexicana</i>	1	14.0	14.0	14.0	6.4	6.4	6.4	6.4
<i>Vaccinium sp.</i>	2	-	-	-	15.0	7.5	2.4	12.6
<i>Zygia longifolia</i>	3	13.0	13.0	13.0	25.3	8.4	0.8	23.8
<b>Total general</b>	<b>252</b>	<b>23.9</b>	<b>6.7</b>	<b>85.0</b>	<b>4739</b>	<b>19.1</b>	<b>0.2</b>	<b>254.5</b>