



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y RESPUESTA LLUVIA-ESCORRENTÍA DE
CUATRO MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA DEL SUR DEL ECUADOR**

*Tesis previa a la obtención
del título de Ingeniera Civil*

Director:

Ing. Cristian Iván Coello Granda Msc.

Autora:

Erika Priscila Martínez Bravo

Cuenca - Ecuador

Noviembre 2015

Resumen

Debido a la falta de información hidro-meteorológica en la zona andina ecuatoriana, las investigaciones acerca del funcionamiento hidrológico y de la disponibilidad de agua para uso humano de estos ecosistemas son todavía escasas. En la presente investigación se realizó el análisis hidrológico de cuatro microcuencas de alta montaña del sur del Ecuador monitoreadas por PROMAS-Universidad de Cuenca desde 2004, con el fin de definir el estado de conservación de cada una. A partir de la información de lluvia-escorrentía se determinó el balance hídrico general, las curvas de duración de caudal y los caudales específicos. También se empleó el modelo WETSPRO para la separación de flujos y se determinaron otros índices hidrológicos con el fin de comparar la respuesta hidrológica de las cuatro microcuencas. Los resultados del balance hídrico evidencian una mayor pérdida de agua por evapotranspiración en las cuencas alteradas. La forma y los índices determinados a partir de las curvas de duración muestran el estado de alteración y la capacidad de regulación. Los porcentajes de caudal base, sub superficial y superficial revelan la capacidad de amortiguamiento ante eventos de precipitación. Se muestra que las cuencas de bosque nativo y pajonal presentan caudales específicos elevados y una buena capacidad de regulación, verificándose la importancia del tipo de suelo y de la topografía. Se indica el efecto negativo que presenta el bosque de pinos en el páramo, demostrándose que la cobertura vegetal no presenta ninguna influencia en la respuesta a los eventos máximos de período de retorno altos.

Palabras clave: *balance hídrico, curvas de duración, caudales específicos, WETSPRO, caudal base, cobertura vegetal*

Abstract

Due to the lack of hydro-meteorological information in the Ecuadorian Andes, research on the hydrological function and availability of water for human use of these ecosystems are still scarce. The hydrological analysis of four of the micro basins of southern Ecuador, monitored by PROMAS (Water and Soil Management Program), University of Cuenca since 2004, has been done in order to establish the conservation status of each one. Based on the rainfall/runoff information, the overall water balance, flow duration curves and specific flows have been defined. For the sub flow filtering, a Microsoft Excel-based tool (WETSPRO) was used. Other hydrological indicators were discovered in order to compare the hydrological response of the four micro watersheds. The results of the water balance show increased loss of water by evapotranspiration in altered watersheds. The shape and the indicators established from flow duration curves show the alteration status and storage capacity. The rate of base, sub surface and surface flow reveal the buffering capacity of precipitation events. It is shown that the micro basins of native forests and grasslands have specific high-flow rates and good water storage capacity, verifying the importance of soil type and topography. The negative effect that presents the pine forest on the páramo has been shown, demonstrating that vegetation-cover presents no influence on the response to maximum events within a high return period.

Keywords: *water balance, flow duration curves, specific flows, WETSPRO, base flow, vegetation-cover*

Índice

Resumen	2
Abstract	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
Índice de ecuaciones	7
Cláusula de derechos de autor	8
Cláusula de propiedad intelectual	9
Agradecimientos	10
Dedicatoria	11
1. Introducción	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Justificación	13
1.3 Revisión bibliográfica	15
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
2. Materiales	22
2.1 Descripción de las zonas de estudio	22
2.2 Cartografía disponible	24
2.3 Información hidro-meteorológica	26
3. Métodos	29
3.1 Procesamiento de información	29
3.2 Balance hídrico general	30
3.3 Índices hidrológicos	32
3.4 Separación de flujos: modelo WETSPRO	36
4. Resultados	38
4.1 Régimen anual de precipitaciones	38
4.2 Balance hídrico general	40
4.3 Respuesta lluvia-escorrentía	43
4.4 Índices hidrológicos	47
4.4.1 Caudales máximos, mínimos, medios diarios	47
4.4.2 Caudales máximos, instantáneos	48

4.4.3 Curvas de duración	49
4.4.4 Índice anual de rapidez de respuesta R-B	51
4.5 Separación de flujos: modelo WETSPRO	52
5. Discusión	55
5.1 Microcuenca del río Ortigas	55
5.2 Microcuenca del río Lise	57
5.3 Microcuenca de Pinos y Pajonal	59
5.4 Comparación entre microcuenca	61
6. Conclusiones y Recomendaciones	65
6.1 Conclusiones	65
6.2 Recomendaciones	67
7. Referencias	68
Anexos	72
1. Microcuenca de estudio	72
2. Correlación entre pluviógrafos	74
3. Curvas de doble masa	74
4. Fechas de información faltante	75
5. Serie completa de caudales medios diarios	77
6. Relleno de caudales en Pinos y Pajonal	78
7. Precipitación media anual	79
8. Curvas de duración	81
9. Parámetros ingresados en el modelo WETSPRO	81

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de Ortigas	23
Figura 2. Mapa de Lise	25
Figura 3. Mapa de Pajonal y Pinos	25
Figura 4. Pluviógrafos "Rain Collector II y HOBO datalogger"	27
Figura 5. Sensores instalados Baro y Diver Schlumberger	27
Figura 6. Vertedero ubicado en la microcuenca de Ortigas	27
Figura 7. Vertedero triangular instalado en Lise	27
Figura 8. Estación meteorológica en Marianza	28
Figura 9. Modelo de reservorio lineal	37
Figura 10. Régimen mensual general de precipitaciones	39
Figura 11. Balance hídrico general de Ortigas	41
Figura 12. Balance hídrico general de Lise	41
Figura 13. Balance hídrico general de Pajonal	42
Figura 14. Balance hídrico general de Pinos	42
Figura 15. Gráfico lluvia-escorrentía de Ortigas	43
Figura 16. Gráfico lluvia-escorrentía de Lise	44
Figura 17. Gráfico lluvia-escorrentía de Pajonal	45
Figura 18. Gráfico lluvia-escorrentía de Pinos	46
Figura 19. Relación entre los caudales máximos y mínimos	48
Figura 20. Curvas de duración de caudal	49
Figura 21. Constante de recesión k correspondiente al flujo base	53
Figura 22. Porcentajes resultantes de la separación de flujos	53
Figura 23. Separación de flujos en la microcuenca de Ortigas	54
Figura 24. Separación de flujos de la microcuenca de Lise	54
Figura 25. Separación de flujos de la microcuenca de Pajonal	54
Figura 26. Separación de flujos de la microcuenca de Pinos	55

Índice de tablas

Tabla 1. Características principales de cada microcuenca	24
Tabla 2. Serie de datos disponible de cada equipo	28
Tabla 3. Pluviógrafos correlacionados	29
Tabla 4. Series de tiempo validadas	30
Tabla 5. Porcentajes de días sin lluvia	39
Tabla 6. Balance hídrico general	40
Tabla 7. Caudales específicos	47
Tabla 8. Caudales específicos máximos instantáneos	48
Tabla 9. Caudales característicos de las curvas de duración	50
Tabla 10. Índices de rapidez de respuesta R-B anual	51
Tabla 11. Resultados de la separación de flujos en el modelo WETSPRO	52

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Balance hídrico simplificado	31
Ecuación 2. Índice de calor mensual	32
Ecuación 3. Índice de calor anual	32
Ecuación 4. Evapotranspiración potencial sin corregir	32
Ecuación 5. Coeficiente a	32
Ecuación 6. Evapotranspiración potencial corregida	32
Ecuación 7. Índice de rapidez de respuesta R-B	35
Ecuación 8. Reservorio lineal	37
Ecuación 9. Ecuación simplificada reservorio lineal	37

Cláusula de derechos de autor

Yo, **Erika Priscila Martínez Bravo**, autora de la tesis "**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y RESPUESTA LLUVIA-ESCORRENTÍA DE CUATRO MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA DEL SUR DEL ECUADOR**", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniera Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, Noviembre 2015



Erika Priscila Martínez Bravo

C.I: 1400574842

Cláusula de propiedad intelectual

Yo, **Erika Priscila Martínez Bravo**, autora de la tesis "**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y RESPUESTA LLUVIA-ESCORRENTÍA DE CUATRO MICROCUENCAS DE ALTA MONTAÑA DEL SUR DEL ECUADOR**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, Noviembre 2015



Erika Priscila Martínez Bravo

C.I: 1400574842



Agradecimientos

Al Ingeniero Cristian Coello, por su paciencia, dedicación y excelente dirección. Gracias por compartir su experiencia y sus valiosos conocimientos durante todo este tiempo.

Al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, por contribuir con la información necesaria para el presente estudio.

A mis familiares y amigos, por el apoyo recibido en la culminación de este trabajo y durante esta etapa de mi vida.

Erika Martínez Bravo

Cuenca, noviembre de 2015



Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por ser mi motivo para salir adelante, por estar siempre a mi lado y por animarme a perseguir mis sueños, a pesar de cualquier circunstancia adversa que se ha presentado en nuestras vidas.

Erika

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Pocas cuencas en la región andina están estudiadas a detalle y, desafortunadamente, la mayoría de acciones de recolección de datos son interrumpidas cuando los proyectos y su financiamiento terminan (Crespo et al., 2014). El desconocimiento de los recursos hídricos ha llevado a muchas personas y organizaciones a alterar ecosistemas andinos, ya sea para usarlos en la producción agropecuaria o forestal (Llambí et al., 2012). Pensando que la (re)forestación ayudaría a mantener los caudales en épocas de estiaje se sembraron árboles de diferentes especies exóticas en los pajonales (Céller et al., 2004), sin pensar en las consecuencias hidrológicas que esto traería (p. e.: Buytaert et al., 2007; Coello et al., 2007; Crespo et al., 2010; Farley, et al., 2004; Hofstede, 2011; Quichimbo et al., 2012).

El efecto de la cobertura es un factor determinante para el análisis de la respuesta hidrológica de una cuenca de montaña. Características naturales de cobertura brindan un soporte adecuado a eventos extremos y regulación en épocas de verano, pero la intervención humana ha hecho que microcuencas con cambios de cobertura se degraden y pierdan sus características (Coello et al., 2007). Las consecuencias del mal manejo de los suelos conlleva a problemas tanto ambientales como socio económicos muy graves. Se vuelve entonces necesario un cambio de actitud en la gente y priorizar las actividades de conservación y un adecuado manejo del recurso suelo para evitar consecuencias futuras de las cuales lamentarse (Cisneros et al., 2007).

Los impactos hidrológicos del cambio de uso y/o cobertura vegetal afectan a varios componentes del ciclo hidrológico incluyendo la evapotranspiración, infiltración y escorrentía superficial (Molina et al., 2012). Por ejemplo, según (Buytaert et al., 2007; Céller et al., 2004), el rendimiento hídrico anual de la microcuenca con pinos es un 50% menor al observado en la cuenca de pajonales, lo que indica que las pérdidas por evapotranspiración son del 50% (despreciando las pérdidas por percolación profunda).

A partir de los datos de monitoreo de una cuenca procesados y validados es posible determinar índices con los que se puede tener una idea de la cantidad

de este recurso que se puede emplear para riego, uso humano e industrial, hidroeléctricas; con el fin de conservar su ecosistema y no degradarlo. Se han utilizado curvas de duración de caudal y se ha calculado el balance hídrico para cuantificar los impactos causados por el cambio de uso de la tierra en respuesta hidrológica y en el rendimiento hídrico (Crespo et al., 2014).

Gracias a proyectos de investigación realizados por PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo – Universidad de Cuenca) se implementaron sistemas de monitoreo hidrológico en cuatro microcuencas de montaña ubicadas en el sur del Ecuador hace aproximadamente 10 años. En la actualidad se dispone de información de topografía, tipo de suelos, precipitación, caudal y clima de cada microcuenca, lo que permite estudiar a detalle esos ecosistemas y determinar su correspondiente estado de conservación.

1.2 Justificación

Las cuencas de alta montaña de los Andes funcionan como reguladores importantes del agua y suministro de nutrientes a los tramos aguas abajo del río Amazonas. Interacciones entre actividades humanas y el medio ambiente han transformado el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas andinos (Molina et al., 2012). La falta de conocimiento sobre el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas alto andinos es una fuente importante de incertidumbre que limita la evaluación del potencial impacto de proyectos que alteran la hidrología y el nivel de debate al respecto (De Bièvre & Acosta, 2012).

El estado de degradación y pérdida de los ecosistemas limita la posibilidad de recuperar la capacidad de regulación en el ciclo hidrológico. Se puede recuperar parcialmente restaurando la vegetación nativa, pero la degradación de los suelos es irreversible, lo que demuestra la importancia de proteger y conservar los ecosistemas de páramo. Por esto, tener conocimiento acerca de la transformación lluvia-escorrentía, procesos hidrológicos y el control del ciclo del agua es esencial para la determinación de servicios de aprovisionamiento de agua para los ambientes andinos (Céller & Feyen, 2009).

Ya que la extracción de agua subterránea es escasa y difícil de explotar, la mayoría de grandes ciudades en el norte de los Andes (p.e.: Bogotá, Quito) dependen del páramo para suministro de agua. Debido a las circunstancias climáticas especiales, los suelos volcánicos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, y su topografía formada por la acción de los glaciares, la hidrología superficial del páramo tiene características extraordinarias. Comparado con cuencas montañosas en otras regiones, los ríos que descienden desde los páramos tienen un flujo base sostenido como un resultado de la elevada capacidad de regulación del agua del páramo. Sin embargo, esta función está amenazada por un incremento de la actividad humana durante los últimos años. Cada vez más, el páramo es usado para pastoreo intensivo de ganado, cultivos de papas y fréjoles y plantaciones de pinos entre otros. (Buytaert et al. 2006). A pesar de la importancia socioeconómica de los ríos descendientes de los páramos, el impacto de las plantaciones de pino en el régimen hidrológico del páramo ha recibido poca atención (Buytaert et al., 2007). El monitoreo se ha enfocado en zonas pobladas.

Según (Cuesta et al., 2009), los bosques andinos son fundamentales en la provisión de servicios ecosistémicos principalmente vinculados al agua, a la regulación climática regional y a la captura y almacenamiento de carbono. Son ecosistemas frágiles y estratégicos. Cumplen un papel importante en el balance de CO₂ de la atmósfera, pues pueden llegar a acumular entre 20 y 40 toneladas de carbono por hectárea, lo que los convierte en un importante sumidero. Además, indica que estas áreas pudieran tener un valor estratégico alto en el momento de desarrollar acciones de adaptación y mitigación en respuesta a los impactos del cambio climático.

Resulta importante la conservación de cuencas no intervenidas. La degradación una vez alcanzado cierto nivel ya no es recuperable y se prolonga aceleradamente. Las consecuencias hidrológicas pueden ser devastadoras, puesto que las cuencas no son capaces de controlar eventos máximos de precipitaciones y las posibles consecuencias de inundaciones y destrucción están presentes. Por otro lado, en épocas de verano, la escasez de agua puede ser más peligrosa puesto que la falta de agua para riego o consumo humano puede generar problemas sociales profundos. A todo esto se suma también las

pobres características de estructura de los suelos degradados que no permiten realizar actividades agrícolas eficientes (Cisneros et al., 2007).

La red de monitoreo de PROMAS-Universidad de Cuenca se encuentra funcionando desde 2004 en las microcuencas de estudio del presente trabajo de titulación. Actualmente se dispone de mayor información con la cual poder definir el estado de conservación de estas microcuencas de alta montaña.

A través del presente estudio se analizarán los efectos hidrológicos de la cobertura vegetal a partir de la información de lluvia-escorrentía de cuatro microcuencas proporcionada por el centro de investigación PROMAS-Universidad de Cuenca. Se determinará el balance hídrico general, las curvas de duración, algunos índices hidrológicos y; empleando el modelo hidrológico WETSPRO, se realizará la separación de flujos para poder comparar la respuesta hidrológica de las cuatro microcuencas. De esta manera se pretende contribuir al conocimiento científico y recomendar acciones guiadas hacia un correcto manejo y planificación de los recursos hídricos y naturales de las cuencas hidrográficas de alta montaña del sur del Ecuador.

1.3 Revisión bibliográfica

A partir de las investigaciones realizadas a lo largo de los últimos veinte años en ecosistemas de alta montaña de los Andes se ha podido definir la hidrología de estas zonas y los efectos del impacto humano sobre las mismas.

El mecanismo de regulación más significativo en los ecosistemas alto andinos es el almacenamiento de agua en los suelos que van dejándola ir por efecto de la gravedad a los riachuelos y ríos. Los suelos con alto contenido de materia orgánica, cobertura vegetal conservada y micro topografía formada por la última glaciación, permiten almacenar gran cantidad de agua en la superficie del suelo o a poca profundidad. Los suelos degradados en términos hidrológicos y nutricionales son aquellos que han perdido capacidad de infiltración y de almacenamiento, por lo tanto su capacidad de regulación. Este mecanismo de regulación tan apreciado en las cabeceras de las cuencas es tan frágil como sus suelos. Si se les quita la protección que les da la cobertura vegetal

(compactándola o removiéndola) los suelos pierden rápidamente sus extraordinarias propiedades hidrológicas, muchas veces de forma irreversible cuando esto implica el colapso de su frágil estructura (De Bièvre & Acosta, 2012).

Los tipos de suelo presentes en las microcuenca de estudio se definieron en los estudios realizados por (PROMAS, 2011):

- Andosoles. Formados a partir de materiales volcánicos, generalmente cenizas aerotransportadas. Presentan características muy especiales desde el punto de vista químico y físico. Respecto a la química de estos suelos, el aspecto más relevante es el elevado contenido de materia orgánica y una muy textura franca que beneficia las propiedades hidrofísicas del suelo, como son la capacidad de retención de agua y de infiltración, favoreciendo los procesos de escorrentía subsuperficial.
- Cambisoles. Son suelos en transformación. Presentan como característica relevante un horizonte de alteración cámbico, caracterizado por la acumulación de arcilla proveniente de las capas superiores. En este contexto el contenido de materia orgánica es muy bajo.
- Leptosoles. Son suelos superficiales, con profundidad menor a 30 cm y yacen sobre una capa de roca o material endurecido (que puede ser carbonato de calcio). Son suelos poco desarrollados y muy delgados, lo que les hace muy susceptibles a procesos erosivos. Estos suelos condicionan el adecuado desarrollo de especies vegetales debido a que su sistema radicular no dispone de un medio apropiado para desarrollarse.

La vegetación es un parámetro muy importante que incrementa la capacidad de infiltración de los suelos influenciando el tiempo y duración de la escorrentía (Morgan et al., 1997; citado en Coello et al., 2007). Las coberturas vegetales predominantes de las cuatro microcuenca de estudio son:

- Bosque montano en la microcuenca de Ortigas. Se trata de vegetación arbórea nativa de crecimiento irregular. Los suelos de este bosque están protegidos por una capa de materia orgánica en descomposición (hojas y troncos) y por diversas especies de musgos (PROTOS-PROMAS, 2008).

- Chaparro y matorrales en la microcuenca de Lise. El chaparro es cobertura vegetal que está casi totalmente destruida. Los matorrales (vegetación nativa) se pueden encontrar en quebradas o sitios poco accesibles. Se encuentran desde 2800 a 4200 m de altitud en todos los países que poseen páramos. Dominan arbustos de porte bajo a medio y/o bambúes. Generalmente poseen mayor cobertura en vertientes húmedas y en zonas de contacto con el subpáramo. Son alterados por la presencia humana, debido a la práctica de extracción de leña. En muchos sitios, han sido sustituidos por pajonales, debido a quemas frecuentes o sobrepastoreo (Llambí et al., 2012).
- La cobertura de Pajonales se encuentra desde los 3000 m de altitud. Son muy comunes en Ecuador y Perú, pero también hay en Colombia y Venezuela. Están en páramos de origen natural húmedos, pero pueden aparecer en zonas muy secas o en arenales. Muchos páramos degradados por la acción humana (fuego, ganadería) se transforman también en pajonales (Llambí et al., 2012).
- Bosque de pinos. Se trata de una especie exótica introducida junto con los eucaliptos desde principios del siglo XX en muchos páramos andinos, con el fin de conservar las cuencas y tener provisiones de madera, transformando estos ecosistemas en bosques artificiales. En realidad, este tipo de forestación tuvo impactos ecológicos considerables, como la alteración del paisaje, cambios en la diversidad vegetal originaria de los páramos, además de la acidificación marcada del suelo, pérdida de materia orgánica, nitrógeno y en algunos casos, de fósforo disponible (Llambí et al., 2012).

Los ecosistemas dominados por árboles juegan un papel importante en la regulación de los flujos hídricos sub superficiales. Ese efecto regulador depende en buena medida de las características de la vegetación en sus compartimientos aéreos y subterráneos (Ataroff, 2002).

Los bosques andinos naturales tienen un papel importante para la hidrología y el control de la erosión (Hofstede, 2011). Estos bosques tienen una importancia global por ser reservorios de biodiversidad y por sus excepcionales funciones de

regulación hídrica y mantenimiento de una alta calidad del agua (Bubb et al., 2004 citado en Cuesta et al., 2009).

El comportamiento hidrológico del bosque nativo en el páramo está muy mal documentado, ya que sólo existen pequeñas zonas con esta cobertura vegetal en lugares protegidos de difícil acceso (Buytaert et al., 2008).

En la segunda mitad del siglo XX, la reforestación con especies exóticas se convirtió en la principal actividad en la conservación de cuencas hidrográficas. Una vez que surgieron resultados de investigaciones serias en diferentes partes del mundo, acerca del efecto de plantaciones forestales con especies exóticas de rápido crecimiento sobre la biodiversidad, suelos e hidrología, fue evidente que no siempre es positivo (Hofstede, 2011).

Se han realizado estudios que concluyen que la forestación con pinos implica un aumento de la evapotranspiración y una escorrentía reducida en comparación con una vegetación baja (Hofstede, 1998). En (Bosch & Hewlett, 1982) se concluyeron de los resultados de 94 estudios de cuencas comparativas que los bosques de pinos y eucaliptos causan en promedio una reducción de 40 mm en escorrentía anual por cada 10% de cambio en cobertura respecto a pastos. En (Farley et al., 2004) se muestra que la conversión de pajonales a plantaciones de pinos en suelos volcánicos reduce significativamente la capacidad de retención de agua de los Andosoles. También se indica que las plantaciones de pinos sobre los Andosoles contribuyen a la acumulación de carbono mientras que los árboles están creciendo. Sin embargo, tiene el efecto de detener el proceso de acumulación de carbono en el suelo. En (Llambí et al., 2012) se advierte que la preocupación en los bosques de pinos es debida a que el carbono está siendo transferido de un reservorio más estable y seguro (el suelo) a otro (plantación) que puede desaparecer por quemas. Cuando la plantación sea cosechada, el efecto neto en el ecosistema será negativo, pues incluso la capa de hojarasca suele ser quemada antes de realizar una nueva plantación.

En (Coello et al., 2007) se indica que la microcuenca de pinos presenta excelentes condiciones de control de crecientes pero su efecto hidrológico es totalmente contradictorio. En (Buytaert et al., 2008) se menciona que estudios realizados en la zona de El Cajas muestran una disminución en la producción de

agua hasta en un 70%. Otros estudios han reportado reducciones similares al convertir pastizales a plantaciones de pino (p. e.: Céller et al., 2004, Farley et al., 2005, Adams & Fowler, 2006, Buytaert et al., 2007).

Debido también a la mayor evapotranspiración de los pinos, se observa una drástica reducción de los caudales bajos y medios, lo que ocasiona que los suelos permanezcan más secos debido a que el bosque de pinos absorbe más agua disponible en la zona de raíces (Crespo et al., 2014). Además, en (Céller et al., 2004) se indica que se produce una reducción significativa tanto de caudales pico como de caudales base. Dentro del proyecto EPIC FORCE realizado por PROMAS en 2008 se indica que para eventos extremos, los caudales específicos pico generados entre una cuenca de pajonal y otra forestada con pinos fueron de similar magnitud, lo que descartó el posible servicio ambiental de los pinos de atenuar crecidas excepcionales.

También existen estudios que indican que el efecto de las plantaciones forestales en áreas degradadas sí es positivo: en estos casos sí ayudan a restaurar el suelo degradado y a recuperar así la capacidad de regulación hídrica que se había perdido (Hofstede, 2011). En estudios efectuados en toda la sierra ecuatoriana, (Hofstede, 1997) concluyó que no se puede generalizar el efecto de plantaciones de pinos: este efecto depende de la región, el uso anterior de la tierra y el manejo actual de la plantación. Sin embargo, existe la tendencia general de que las plantaciones de pinos están relacionadas con sitios de menor materia orgánica, menor humedad y textura gruesa. Un fenómeno general es que el pH del suelo disminuye bajo plantación. Por las grandes diferencias entre regiones, no se puede probar estadísticamente este efecto negativo de las plantaciones (Hofstede, 1998).

Es razonable pensar que los bosques nativos tienen un consumo de agua más bajo que las plantaciones de pino por tres razones:

- En las plantaciones de pinos todos los árboles están en la misma etapa de crecimiento y son cosechados cuando maduran
- En los bosques de pinos no hay diversidad de vegetación
- Es probable que los pinos tengan menor eficiencia del uso del agua debida a una menor adaptación metabólica (Buytaert et al., 2008).

La comparación directa con los páramos naturales es muy difícil, ya que los páramos accesibles donde el pastoreo nunca ha tenido lugar son muy escasos. Sin embargo, varios experimentos hidrológicos y observaciones en estos páramos sugieren que la capacidad de regulación hidrológica sigue siendo muy alta (Buytaert et al., 2008).

La alta producción de agua de los páramos húmedos se debe principalmente a una alta cantidad de precipitación distribuida en el tiempo de una forma bastante uniforme (Buytaert et al. 2006b). En cambio, las propiedades de los suelos, topografía y la vegetación influyen en la regulación hidrológica cuando el agua se mueve dentro del suelo. La alta producción hídrica de las cuencas de pajonal también se debe al bajo consumo de agua de la vegetación en estos ecosistemas naturales (Crespo et al., 2014). Los eventos de lluvia en el páramo son típicamente de frecuencia alta y de baja intensidad. El consumo natural de agua en el páramo es muy bajo debido a la predominancia de pajonales y de hierbas xerofíticas con características de baja evaporación, a pesar de la radiación alta a esas altitudes y latitudes. Las pocas estimaciones existentes de la evapotranspiración actual en el páramo están en el rango de cerca de 1 a 1.5 mm/día. Como resultado de la baja evapotranspiración, hay un gran excedente de agua, alimentando los ríos que descienden hacia las regiones costeras y a la cuenca Amazónica. Junto a una alta producción de agua, la capacidad de regulación de agua del páramo es casi legendaria entre agricultores y científicos. De hecho, muchos ríos de páramo proveen un flujo base sostenido a través del año (Buytaert et al. 2006).

Varios autores referidos en (Vuille, 2013) coinciden en que los ríos alimentados por páramos se caracterizan por tener un caudal base elevado, por la capacidad de retención de agua de los suelos y de la vegetación; y, que se enfrentan con la amenaza del cambio climático puesto que las temperaturas más altas ocasionarían mayores tasas de evapotranspiración y por consecuencia, una menor producción de agua de los páramos (Andrade, 2014).

Según (Llambí et al., 2012), en la actualidad existen diversos tipos de intervención humana en los páramos, tales como:

- Desarrollo de sistemas agropecuarios semi-tradicionales e intensivos

- Ganadería extensiva e intensiva
- Forestación con especies exóticas (pinos, eucaliptos)
- Minería a pequeña y gran escala (oro, carbón)
- Extracción de leña y plantas medicinales
- Cacería

Al igual que en la mayoría de páramos, los páramos del Cajas han sido quemados con frecuencia. Aunque estos incendios tienen un impacto importante en la biodiversidad local, su impacto en las propiedades del suelo es probablemente baja. Debido al clima húmedo perenne en los páramos ecuatorianos del sur, las quemas son de baja intensidad y el suelo permanece constantemente húmedo. El contenido volumétrico de agua de la capa superior del suelo oscila normalmente entre el 60 y el 80% (Buytaert, 2004) y protege el suelo de los daños causados por el fuego (Buytaert et al., 2008).

Contrario al resto de los Andes tropicales y las tierras altas que cubren la parte superior de los Andes desde la depresión de Huancabamba en el Perú hacia el sur, la actividad humana en la mayoría de los páramos del sur ecuatoriano no es intensiva. La actividad más extendida en la historia reciente fue el pastoreo extensivo de vacas y ovejas, en muchos casos, combinados con la quema (Buytaert et al., 2008). Según (Crespo et al., 2014) el pastoreo extensivo parece ser el uso de tierra más sostenible desde el punto de vista hidrológico. Sin embargo, depende mucho de la carga animal e intensidad de las quemas. Además indican que el pastoreo extensivo con quemas puntuales anuales lleva a una disminución en la cantidad de agua que sale de la cuenca.

Hasta donde se conoce, no existen datos cuantitativos sobre la densidad de pastoreo histórica de la región de páramo incluyendo el Parque Nacional Cajas. Sin embargo, es poco probable que la capacidad de carga natural del páramo, de pocos animales por km^2 (Schmidt y Verweij, 1992; Molinillo y Monasterio, 1997) se haya superado recientemente (Buytaert et al., 2008).

En el estudio realizado por (Quichimbo et al., 2012) se concluye que la transición de pajonal a cultivo de papas, pasto, pino o la quema de pajonal, estaría disminuyendo el contenido de humedad en los puntos de saturación y capacidad de campo. De igual manera, se observó que la densidad aparente aumenta bajo

condiciones antrópicas (pasto, cultivo de papas y bosque de pino) lo que afecta la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. En cuanto a las propiedades químicas, a nivel superficial, se indica que las coberturas antropizadas de pasto, cultivo de papas y pino promueven la acidificación de los suelos por la disminución del porcentaje de saturación de bases diferenciándose de las coberturas sin alteración que muestran valores más elevados de pH.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Analizar la respuesta lluvia escorrentía de cuatro microcuencas de alta montaña con diferente régimen climático y cobertura vegetal.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterización de las precipitaciones y validación de los caudales en los últimos años en las microcuencas de estudio.
- Realización del balance hídrico general.
- Manejo y calibración del modelo hidrológico WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing) para separación de flujos.
- Determinación de caudales específicos, curvas de duración e índices hidrológicos de cada microcuenca, para cuantificar el grado de conservación de los ecosistemas.

2. Materiales

2.1 Descripción de las zonas de estudio

Se emplearon datos de cuatro microcuencas de alta montaña proporcionados por PROMAS-Universidad de Cuenca. Gracias a proyectos de investigación, estas microcuencas son monitoreadas desde 2004, y sus estaciones siguen funcionales en la actualidad. A partir de investigaciones anteriores también se han determinado sus características físico-geográficas.

Las microcuencas con las que se trabajó son:

Ortigas.- Se encuentra localizada en la cuenca alta del Río Bulubulu, dentro del cantón Cañar, provincia del Cañar. Respecto a la cobertura vegetal, esta microcuenca posee predominantemente cobertura de bosque montano bajo (78%) con poca o ninguna alteración humana y pasto en la parte alta en un 22%. El clima de esta zona se caracteriza por tener una marcada variabilidad espacial y temporal. En cuanto al tipo de suelo, predomina el Andosol, y en menor proporción se encuentra el Cambisol y Leptosol (Coello et al., 2008).

Lise.- Está situada en el centro sur del Ecuador, en la provincia de Chimborazo, y pertenece a la cuenca del río Chanchán. El suelo es rico en materia orgánica procedente de la formación Puñay. La vegetación predominante está compuesta por matorral denso, aunque esta cobertura vegetal desaparece casi por completo durante el verano. La topografía de esta microcuenca se caracteriza por fuertes pendientes (Crespo et al., 2008). Los tres tipos de suelo en lise son: Leptosol úmbrico (es el más abundante), Cambisol y Andosol (Krajenbrink, 2007).

Pajonal y Pinos.- Son microcuencas de páramo. Están caracterizadas por un clima frío y húmedo. La precipitación es extremadamente variable en espacio y tiempo, y generalmente presentan intensidades de lluvia bajas (Buytaert et al., 2006). Se encuentran ubicadas al noroeste de la ciudad de Cuenca en la provincia del Azuay, en el sector de El Cajas conocido como Marianza. El tipo de suelo predominante en la zona es el Andosol. La microcuenca de Pajonal se encuentra poco intervenida, mientras que la microcuenca de Pinos tiene una cobertura de bosque exótico de Pinos en un 98%. Las intensidades de lluvia son bajas, los vientos pueden ser muy fuertes y altamente variables en dirección, debido a las pendientes fuertes y lo accidentado de la topografía (PROMAS, 2011).

Fotografías correspondientes a las microcuencas de estudio se encuentran en el anexo 1.

Las microcuencas de Ortigas y Lise drenan sus aguas hacia el océano Pacífico y presentan un régimen de lluvias occidental. El invierno está definido entre los meses de diciembre a mayo, donde se produce cerca del 90% de la precipitación total anual. El verano se da desde junio hasta noviembre. Por otro lado, las

microcuencas de Pajonal y Pinos drenan sus aguas hacia el Atlántico y presentan un régimen de lluvias oriental. Registran lluvias constantes durante todo el año, con mayores valores en los meses de marzo a mayo. Las precipitaciones en estas dos microcuencas son menores a las precipitaciones registradas en Ortigas (PROMAS, 2011).

Las pendientes medias de las cuencas en estas microcuencas están alrededor del 45%, por lo que queda la cobertura del suelo como uno de los factores relevantes para el análisis (Coello et al. 2008).

En la tabla 1 se presentan las principales características de cada microcuenca.

Tabla 1. Características principales de cada microcuenca. Fuente (PROMAS)

	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
Área (km²)	0.99	2.34	1.003	0.59
Cobertura	Bosque nativo	Matorral	Pajonal	Bosque pinos
Tipo de Suelo	Andosol	Leptosol	Andosol	Andosol
% Área predominante	74	69	86.4	98
Uso del Suelo	Bosque nativo, Pastos	Pastoreo	Ganadería Extensiva	Pinos
Estado	Inalterada	Intervenida	Inalterada	Forestada
Forma de la Cuenca	Ovalada Alargada	Ovalada alargada a rectangular	Ovalada Alargada	Redonda-Ovalada
Perímetro (m)	4750	6840	4816	3102
Cota máxima (m.s.n.m)	2880	3240	3740	3700
Cota mínima (m.s.n.m)	2305	1680	2980	3240
Desnivel máximo (m)	575	1560	760	460
Precipitación anual (mm)	1540	784	1239	1181

2.2 Cartografía disponible

A través de imágenes satelitales y fotografías aéreas se identificaron las microcuencas y se determinó la cobertura vegetal predominante. Mediante

levantamiento con GPS se determinaron los límites entre las diferentes coberturas vegetales. Con la ayuda de GIS se realizaron modelos de elevación digital y se determinaron los porcentajes de las diferentes coberturas de cada microcuenca (PROMAS, 2011).

Los usos del suelo, el clima y el estado de alteración fueron inspeccionados mediante visitas de campo. Los tipos de suelo también se evaluaron mediante salidas de campo, recolección de muestras y análisis completos de laboratorio. Mediante el uso de cartografía existente se determinaron las características morfométricas de las cuencas (Cisneros et al., 2007).

A continuación se presentan los mapas de cada microcuenca generados con la ayuda de Arc-GIS:

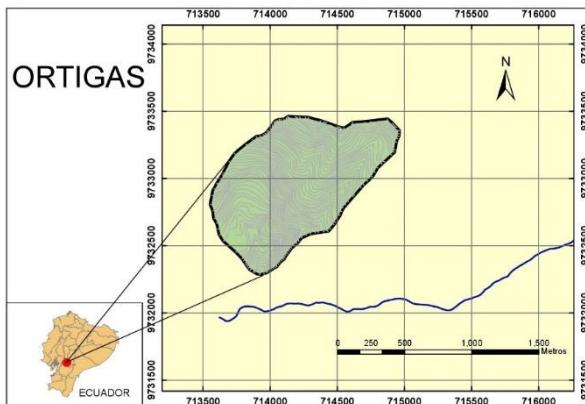


Figura 1. Mapa de Ortigas

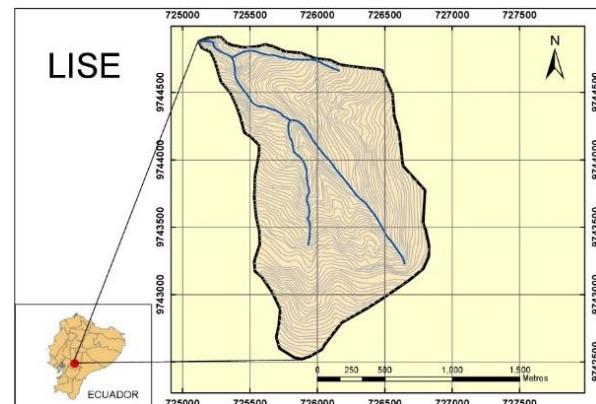


Figura 2. Mapa de Lise

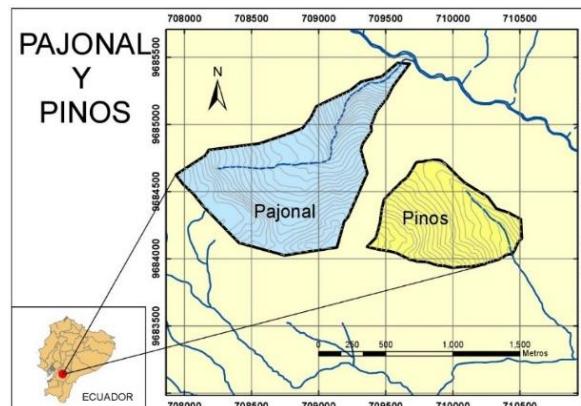


Figura 3. Mapa de Pajonal y Pinos

2.3 Información hidro-meteorológica

En el interior de las microcuenca existe equipo para monitoreo de precipitación, caudal y clima. El equipamiento forma parte de la red hidro-meteorológica de PROMAS-Universidad de Cuenca. Para el presente estudio se dispone de datos promedios diarios de precipitación, temperatura y caudal.

Existe una red de pluviógrafos distribuida eficientemente para una adecuada caracterización de las precipitaciones. Los pluviógrafos empleados son de cubeta basculante, y tienen resolución de impulso de 0.2mm. Estos pluviógrafos utilizan dos cubetas. La lluvia llena una cubeta, y se produce un desbalance que dirige el flujo hacia la segunda cubeta. El movimiento basculante se transmite hacia el aparato de registro automático (datalogger) y mide la distribución e intensidad de la precipitación (PROMAS, 2011).

La medición de caudales se realiza mediante vertederos triangulares de cresta delgada ubicados a la salida de cada microcuenca, en los cuales se mide las alturas de agua mediante sensores de nivel ubicados en la sección de control. A partir de ecuaciones conocidas de los vertederos triangulares es posible calcular los caudales que pasan por la estructura de medición, cada fracción de tiempo que se crea conveniente.

También están instaladas estaciones climatológicas para la medición de: velocidad y dirección del viento (anemómetro), radiación solar (piranómetro), y sensores para determinar temperatura, humedad relativa, presión barométrica, temperatura de rocío.

Adicionalmente se dispone de datos de precipitación del pluviógrafo de Chontamarca, cercano a Ortigas, el cual se empleará para el relleno de precipitaciones.

El procesamiento de datos tanto de precipitaciones como de niveles es automático. Las precipitaciones tienen una resolución temporal de 5min y los niveles cada 15 min. Esta precisión permite encontrar valores máximos reales y no promedios generales diarios que subestiman las mediciones registradas (Coello et al., 2007).

En las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 se muestran los equipos de medición utilizados por PROMAS-Universidad de Cuenca en estas microcuenas:



Figura 4. Pluviógrafos “Rain Collector II y HOBO datalogger”. Fuente (PROMAS, 2011)



Figura 5. Sensores instalados Baro y Diver Schlumberger. Fuente (PROMAS, 2011)



Figura 6. Vertedero ubicado en la microcuenca de Ortigas. Fuente (PROMAS, 2011)



Figura 7. Vertedero triangular instalado en Lise. Fuente (PROTOS-PROMAS, 2008)



Figura 8. Estación meteorológica en Marianza. Fuente (PROMAS)

En total se cuenta con información de 5 pluviógrafos, 3 estaciones climáticas y 4 estaciones limnigráficas a la salida de cada una de las microcuenca.

La serie de datos disponible para cada estación se presenta en la tabla 2:

Tabla 2. Serie de datos disponible de cada equipo

Nombre	UTMx	UTMy	Altura (m.s.n.m.)	Tipo	Serie Disponible
Ortigas	713818	9732708	2462	Pluviógrafo	08/11/2005 - 25/02/2015
Lise	725404	9744935	1856	Pluviógrafo	05/03/2005 - 02/10/2014
Pajonal	708862	9684686	3439	Pluviógrafo	29/05/2004 - 18/02/2015
Pinos	709876	9684662	3376	Pluviógrafo	29/05/2004 - 20/11/2014
Chontamarca	712446	9731058	2254	Pluviógrafo	07/10/2005 - 25/02/2015
Ortigas	713907	9732284	2305	Limnigráfica	01/08/2005 - 25/02/2015
Lise	725120	9744907	1696	Limnigráfica	03/02/2005 - 06/08/2014
Pajonal	709625	9685431	2979	Limnigráfica	29/02/2004 - 10/02/2015
Pinos	710455	9684041	3240	Limnigráfica	08/05/2004 - 09/10/2014
Chontamarca	712446	9731058	2254	Climática	07/10/2005 - 25/02/2015
Marianza	708890	9684605	3454	Climática	07/10/2005 - 10/01/2005
Namza Lise	725665	9746066	1820	Climática	18/11/2005 - 28/05/2015

3. Métodos

3.1 Procesamiento de información

La información de precipitaciones promedias diarias entregada por PROMAS-Universidad de Cuenca tuvo que ser validada mediante la aplicación de pruebas estadísticas no paramétricas como las curvas de doble masa, eliminando en cada caso datos dudosos que podrían deberse a errores de medición de los equipos.

Para el relleno de datos faltantes se emplearon análisis de regresión y técnicas de correlación con otras estaciones (ver anexos 2, 3, 4, 5, 6).

Los pluviógrafos empleados para el relleno de precipitaciones se presentan en la tabla 3:

Tabla 3. Pluviógrafos correlacionados

Pluviógrafo original	Pluviógrafo correlacionado	Fecha inicio	Fecha fin	Coeficiente Correlación R
Ortigas	Chontamarca	01/12/2005	31/01/2015	0.94
Pajonal	Pinos	01/06/2004	31/10/2014	0.96

Se consideró aceptable un coeficiente de correlación igual o mayor a 0.75, por lo que se pudieron emplear para el relleno de precipitaciones en Ortigas los datos del pluviógrafo de Chontamarca.

No se dispone de información tal que permita el relleno de caudales medios diarios a lo largo de toda la serie de tiempo de monitoreo en las microcuenca de estudio. Con el fin de no generar incertidumbre en los resultados se trabajó con información consistente de períodos de años consecutivos validados tanto para la determinación del balance hídrico como para la separación de flujos con el modelo WETSPRO (Willems, 2009).

De cada microcuenca se seleccionó la serie de tiempo que requiriera el mínimo relleno de información. Por esto, en la microcuenca del río Lise se trabajó con 3 años de datos, en la microcuenca del río Ortigas con 7 años de datos y en las microcuenca de Pajonal y Pinos con 6 años de datos. De esta manera se ignoraron vacíos considerables de información que se presentan en el anexo 5,

debidos posiblemente a varios factores como la intervención de los habitantes de la zona, averías de los equipos de medición, mantenimiento de los sensores de nivel o limpieza de sedimentos acumulados

Tabla 4. Series de tiempo validadas

Microcuenca	Serie de tiempo validada
Ortigas	01/08/2005 - 14/11/2012
Lise	01/09/2005 - 22/06/2008
Pajonal	23/10/2007 - 10/09/2013
Pinos	23/10/2007 - 10/09/2013

En las microcuenca de Pajonal y Pinos se trabajó con la misma serie de tiempo, debido a su cercanía y para facilitar la comparación entre ambas.

Entre los caudales de las estaciones de Pajonal y Pinos se encontró un coeficiente de correlación R de 0.76, como se presenta en el anexo 6, por lo que se llenaron los datos faltantes de caudales medios diarios de una estación a partir de la otra. Los datos faltantes de caudales medios diarios de Lise se llenaron mediante relaciones lineales entre los caudales existentes. Debido a que se trata de pequeños vacíos de información y a que son caudales promedios diarios (y no instantáneos), esta información llenada no afectará a los resultados obtenidos, solo permitirá la continuidad de los análisis anteriores.

3.2 Balance hídrico general

El balance hídrico es la herramienta más útil para los hidrólogos (Llambí et al., 2012). Por medio de éste se puede calcular la cantidad de agua existente para estudios de oferta y demanda en las microcuenca en un determinado intervalo de tiempo.

La ecuación de balance hídrico es una expresión muy simple, aunque la cuantificación de sus términos es normalmente complicada por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (en acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en la cuenca (Llorens, 2003).

Se determinó el balance hídrico general a partir de valores promedios mensuales validados de precipitación, caudal y evapotranspiración, de las series de tiempo indicadas en la tabla 4. La ecuación del balance hídrico simplificado es:

Ecuación 1. Balance hídrico simplificado

$$\text{Precipitación} = \text{Caudal} + \text{Evapotranspiración}$$

En las microcuencas de Ortigas y Lise se consideró el mes de diciembre como inicio del año hidrológico, debido a su régimen de precipitaciones occidental. Por otro lado, en las microcuencas de Pinos y Pajonal se consideró el mes de septiembre como inicio del año hidrológico, debido a su régimen de precipitaciones oriental.

Un aspecto importante que se puede determinar a partir del balance hídrico es el rendimiento hídrico de las microcuencas, el cual se define como la cantidad de agua superficial por unidad de superficie de una cuenca, en un intervalo de tiempo dado (l/s/km^2). Este concepto permite expresar la escorrentía por unidad de área para cuantificar la oferta hídrica superficial, estimar valores en unidades hidrográficas no instrumentadas y establecer comparaciones en diferentes unidades de análisis (IDEAM, 2010).

Otro aspecto también importante es la regulación hídrica. La regulación hídrica se produce cuando un ecosistema almacena agua durante períodos húmedos para liberarla durante los períodos secos. Una cuenca degradada donde los suelos se han erosionado puede tener un alto rendimiento hídrico, pero tiene una bajísima regulación. Esto se debe a que se pierde el reservorio natural y por lo tanto la cuenca no puede almacenar agua durante la época de lluvias. Para conocer la regulación hídrica de las microcuencas se requiere conocer parámetros como la relación entre el caudal máximo y el caudal mínimo de las microcuencas, o la relación entre el caudal pico sobre el caudal base (Llambí et al., 2012).

Dada la serie de datos de clima de las estaciones de Chontamarca (para Ortigas), Namza (para Lise) y Marianza (para Pajonal y Pinos) se procedió al cálculo de la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite (Thornwaite & Holzman, 1942).

En primer lugar se debe determinar el índice de calor mensual i a partir de la temperatura media mensual t :

Ecuación 2. Índice de calor mensual

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

A continuación se calcula el índice de calor anual I :

Ecuación 3. Índice de calor anual

$$I = \sum i$$

Y se calcula la evapotranspiración potencial sin corregir:

Ecuación 4. Evapotranspiración potencial sin corregir

$$ETP_{\text{sin corr.}} = 16 * \left(\frac{10t}{I}\right)^a$$

Ecuación 5. Coeficiente a

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 0.49239$$

Se corrige para el número de días del mes y el número de horas de sol:

Ecuación 6. Evapotranspiración potencial corregida

$$ETP = ETP_{\text{sin corr.}} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

N : número máximo de horas de sol y depende del mes y de la latitud

d : número de días del mes

Los valores de la evapotranspiración potencial fueron ajustados en función a la cobertura vegetal de cada microcuenca, considerando los coeficientes dados por la (FAO 56, 2006) más adecuados para cada caso.

3.3 Índices hidrológicos

Conocer la producción hídrica de una cuenca en los diferentes meses del año es un aspecto de vital importancia para un manejo sostenible. Con los datos de caudal registrados se puede conocer y comparar la producción hídrica de cada una de las microcuenca (Célleri et al., 2004).

Es necesario establecer índices hidrológicos para poder definir el estado de conservación de cada microcuenca. Parámetros tales como pendiente, área, cobertura vegetal o tipo de suelo influyen en la generación de escorrentía de la cuenca (Coello et al., 2008). Para poder comparar entre las cuatro microcuencas se trabajará con caudales específicos ($l/s/km^2$), con el fin de eliminar de esta manera el factor área. Se requiere conocer los caudales característicos de las microcuencas tales como caudales máximos, mínimos y medios, ya que son un parámetro clave para definir la capacidad de regulación de las microcuencas.

El flujo natural de un río varía en escalas de tiempo de horas, días, estaciones, años, etc. Generalmente se necesitan muchos años de observación de un medidor de caudal para describir el patrón característico de la cantidad de flujo de un río, el momento y la variabilidad, es decir, su régimen de flujo natural. Cinco componentes críticos del régimen de flujo regulan los procesos ecológicos en los ecosistemas fluviales: la magnitud, frecuencia, duración, tiempo y velocidad de cambio de las condiciones hidrológicas (Richter et al., 1996 citado en Andrade, 2014). Estos componentes pueden ser utilizados para caracterizar toda la gama de flujos y fenómenos hidrológicos específicos, tales como inundaciones o flujos bajos que son críticos para la integridad de los ecosistemas fluviales (Andrade, 2014).

El estudio de caudales bajos o mínimos toma cada vez mayor importancia en relación con la gestión del agua (Andrade, 2014). (Smakhtin, 2001 citado en Andrade, 2014) indica que los caudales bajos son normalmente aportaciones de las descargas subterráneas o aportaciones superficiales de lagos, humedales (páramos) o de glaciales. También indica que los caudales bajos ocurren generalmente en la misma estación del año.

En (Cisneros et al., 2007) se advierte que los caudales mínimos en épocas secas son signo de suelos de pobres características, sin estructura o coberturas con una elevada evapotranspiración. De la misma manera, caudales mínimos altos implican una buena capacidad de regulación de la cuenca en épocas secas.

Si bien los caudales de estiaje y los caudales mínimos, dependen del afloramiento de aguas subterráneas, y de los aportes de lagos, humedales y glaciales (en función del grado de cobertura en la cuenca), es más claro que la

distribución estacional principalmente de las precipitaciones en la zona Andina condiciona los períodos de ocurrencia de aguas bajas, e incluso la magnitud de estos caudales. Los métodos de análisis de los caudales mínimos en relación con la determinación de sus características se sustentan en series de caudales históricos, y consisten básicamente en curvas de duración general, análisis de frecuencias de eventos de caudales mínimos extremos correspondientes a intervalos continuos de caudales bajos; y separación de caudales base y caracterización de las curvas de recesión (Andrade, 2014).

Cuando se dispone de una serie representativa del régimen de caudales medios diarios de la cuenca se puede predecir el comportamiento futuro de este régimen a través de las curvas de duración. Las curvas de duración de caudal proporcionan gran parte de la información necesaria en varias aplicaciones de recursos hídricos (Vogel y Fennessey, 1995) en cuencas de pequeña escala. Estas curvas son útiles para determinar el potencial hidroeléctrico de un río, control de inundaciones, diseño de sistemas de drenaje o para realizar comparaciones entre cuencas. En el caso particular del desarrollo de una pequeña planta hidroeléctrica al borde de un río, la curva de duración de caudales diarios es el elemento más valioso de información sobre el régimen de flujo en el sitio de interés (Warnick, 1984 citado en Niadas, 2005). Con las curvas de duración se puede determinar si una cuenca es suficiente para cubrir la demanda de agua requerida, o la necesidad de construcción de embalses para suplir demandas de agua en épocas secas.

Las curvas de duración de caudales se construyen generalmente utilizando todos los valores registrados. La ventaja de tener datos específicos del lugar donde se requiere la curva de duración es que se dispone de valores representativos de los caudales mínimos extremos dados por las mediciones de realizadas (Niadas, 2005).

La forma y pendiente de las curvas de duración refleja la capacidad de regulación de la cuenca vertiente, debido a condiciones naturales o a la regulación artificial por embalses. El flujo rápido está evidenciado en la primera parte de la curva de duración (hasta el percentil 10) presentando una fuerte pendiente. Este extremo indica la duración de las avenidas. El flujo lento se presenta en la parte final de la curva (a partir del percentil 90), donde se puede observar, por ejemplo, el

Erika Martínez Bravo

tiempo en que cierta parte de la sección del cauce queda al descubierto, o sumergida a una determinada altura por las aguas (Cisneros et al., 2007).

(Baker et al., 2004) desarrollaron un nuevo índice de rapidez de respuesta de un río, el Índice R-B, que tiene varias ventajas sobre los índices de rapidez de respuesta anteriores. La rapidez de respuesta de una cuenca indica la frecuencia y rapidez de los cambios a corto plazo producidos en el caudal tras eventos de tormenta. Se puede producir un incremento o disminución en este parámetro debido a cambios en el manejo o uso del suelo (Baker et al, 2004).

Los valores del índice R-B podrían variar teóricamente de cero a dos. Tendría un valor de cero si el flujo de la corriente fuera absolutamente constante. Su valor aumenta a medida que la longitud de trayectoria y la velocidad aumentan. A diferencia de otros parámetros hidrológicos, este nuevo índice tiene baja variabilidad interanual con respecto a la mayoría de los indicadores del régimen de flujo, y por lo tanto, una mayor capacidad para detectar tendencias (Baker et al., 2004). En consecuencia, se requieren menos años de aforo para cuantificar la rapidez de respuesta de un río. Las tendencias estadísticamente significativas en la rapidez de respuesta se pueden determinar en un período relativamente corto de tiempo. Este nuevo índice es una modificación del Índice de Richards desarrollado anteriormente. El método mide la longitud de la trayectoria de las oscilaciones diarias de flujo para los datos de aforo del río. Trayectorias más largas correlacionan con las corrientes más rápidas, mientras que los flujos más constantes tienen longitudes de trayectoria más cortas (Kotei et al., 2013). El índice R-B puede ser útil como una herramienta para evaluar la eficacia de los programas dirigidos a la restauración de regímenes naturales de caudal, sobre todo cuando los regímenes han sido modificados como consecuencia de prácticas de uso/manejo del suelo (Baker et al., 2004 citado en Kotei et al., 2013).

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Índice de rapidez de respuesta R-B

$$\text{Índice de rapidez de respuesta } R - B = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i}$$

3.4 Separación de flujos: modelo WETSPRO

Dado un evento de precipitación, parte de esta se convierte en escorrentía superficial. Otra parte se infiltra en el suelo y se convierte en flujo sub superficial. Por último, una parte del flujo puede percolarse, convirtiéndose en flujo base. El flujo más rápido es la escorrentía superficial, seguido del flujo sub superficial y del flujo base. La velocidad de respuesta de los dos primeros tipos de escurrimiento es de minutos y horas, mientras que el flujo base puede permanecer muchísimo más tiempo (semanas, varios años o incluso décadas) antes de salir hacia los cauces (Llambí et al., 2012).

Dada la serie continua de caudales establecida anteriormente para cada microcuenca se procedió a realizar la separación de flujos. Para ello se recurrió al modelo WETSPRO (Willems, 2009) basado en el modelo de reservorio lineal y desarrollado por (Willems, 2004).

Este modelo emplea una serie continua de datos de caudal como entrada y calcula los flujos rápidos y lentos por medio de técnicas de separación de sub flujos basadas en la generalización del filtro original de Chapman. La técnica está basada en la ecuación general del “filtro de paso lento” y asume una recesión exponencial para los sub flujos (Willems, 2009 citado en Molina et al., 2012).

Cuando se grafica una serie de datos en el tiempo empleando la escala logarítmica para los caudales, se observa que durante los períodos secos el caudal disminuye de manera lineal, con pendientes de recesión constantes. Esto se conoce como recesión exponencial, ya que en esos períodos el caudal disminuye exponencialmente. Este comportamiento ocurre en la mayoría de cuencas y ríos del mundo, y se puede apreciar tanto en el caudal base como en el caudal sub superficial y en la escorrentía superficial (Willems, 2004).

(Willems, 2004) describe el modelo de reservorio lineal de la siguiente manera.

Existen:

- entradas $q(t) = \text{precipitación en la cuenca}$
- salidas $b(t) = \text{escorrentía de la cuenca}$
- y un tanque de almacenamiento

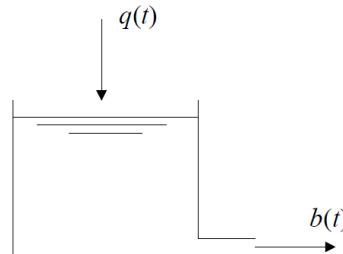


Figura 9. Modelo de reservorio lineal. Fuente (Willems, 2004)

En un modelo de reservorio lineal, el caudal de escorrentía $b(t)$ depende de la precipitación de entrada $q(t)$ a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Reservorio lineal

$$b(t) = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)b(t-1) + (1 - \exp\left(-\frac{1}{k}\right))\left(\frac{q(t-1) + q(t)}{2}\right)$$

Donde

$b(t-1)$ es el caudal de escorrentía en el tiempo $t-1$

$\frac{q(t-1) + q(t)}{2}$ es la precipitación de entrada en el tiempo $t-1$ y en el tiempo t ; se emplea el promedio de la precipitación.

Haciendo que $\alpha = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)$ la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

Ecuación 9. Ecuación simplificada reservorio lineal

$$b(t) = \alpha b(t-1) + (1 - \alpha)\left(\frac{q(t-1) + q(t)}{2}\right)$$

El parámetro k es conocido como constante del reservorio o constante de recesión. Es un buen estimador de la capacidad de amortiguamiento de una cuenca (Céller et al., 2004). Se puede determinar el valor de k analizando la pendiente de los tramos de recesión en cada caso (flujo base, sub superficial, superficial) en los períodos de recesión, empleando la escala semi-logarítmica. Este valor controla qué tan lento el agua es desalojada del reservorio, y se define por características de la cuenca tales como la topografía, uso del suelo, tipo de suelo; las cuales no varían en el tiempo. Además, k es menor para cuencas que están urbanizadas, tienen pendientes más altas o suelos más arenosos (Willems, 2004).

Debido a que no todo el caudal se convertirá en caudal base, se debe emplear un factor de reducción w , el cual es un valor entre 0 y 1, e indica la fracción del caudal total que se convertirá en caudal base. Para determinar el valor de w se debe considerar que el caudal base debe acercarse todo lo posible al caudal total durante las estaciones secas. Los parámetros k y w son los que se requiere determinar en el modelo WETSPRO.

$1 - w$ es el caudal que se convierte en flujo base

k es el número de paso de tiempo que se demora el agua en ser desalojada de la cuenca

A través de la separación de flujos se pretende conocer cuál es la respuesta hidrológica del caudal a la precipitación en cada una de las microcuencas. Se determinan los flujos predominantes en estas microcuencas: caudal superficial, subsuperficial y caudal base. Comparando los resultados entre las microcuencas se puede mostrar la influencia de la cobertura vegetal (Céller et al., 2004) y determinar el estado de conservación de cada una.

Es esencial entender la importancia que tienen las descargas subterráneas de agua para mantener los caudales a lo largo del año. El índice de caudal base se emplea como medida de las características del flujo base de las cuencas. Proporciona una manera sistemática de evaluar el porcentaje de caudal base sobre la escorrentía total de una cuenca. Indica la influencia del suelo y la geología sobre los caudales (Abebe & Foerch, 2006).

4. Resultados

4.1 Régimen anual de precipitaciones

Con los datos de precipitaciones medias mensuales de los años disponibles y validados de cada microcuenca se graficó el régimen mensual general de precipitaciones, que se presenta en la figura 10.

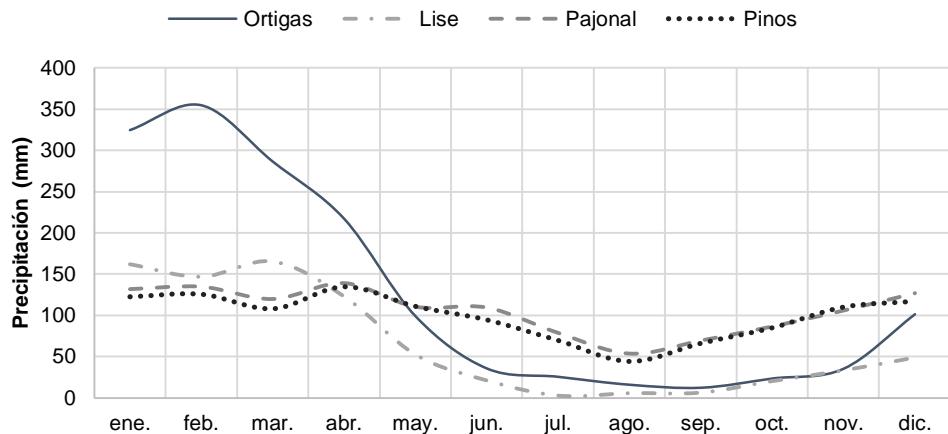


Figura 10. Régimen mensual general de precipitaciones

En este gráfico se identifica el régimen de precipitaciones de costa en las microcuenca de Ortigas y Lise, definido por fuertes lluvias entre diciembre y mayo. A su vez se observa el régimen de precipitaciones oriental en las microcuenca de Pajonal y Pinos, caracterizado por precipitaciones menos intensas pero constantes a lo largo de todo el año.

En la tabla 5 se presenta el porcentaje de días sin lluvia para el período de estudio validado de cada microcuenca:

Tabla 5. Porcentajes de días sin lluvia

	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
% de días sin lluvia	43%	44%	23%	21%

Esta tabla indica que los períodos de verano para las microcuenca de Ortigas y Lise son prácticamente iguales, de igual manera los de Pajonal y Pinos.

Dado el mismo régimen climatológico por un lado, entre las microcuenca de Ortigas y Lise, y por otro entre las microcuenca de Pajonal y Pinos, se justifica el análisis pareado de ciertos índices que se obtendrán más adelante. Otros índices serán analizados y comparados entre las cuatro microcuenca.

Las microcuenca de Pajonal y Pinos presentan características similares, incluso se da prácticamente la misma cantidad de precipitación, ya que son muy cercanas entre ellas como se mostró en la figura 3. Difieren únicamente en su cobertura vegetal. Por esta razón, en estudios anteriores han sido tratadas como

cuencas pareadas (p.e.: Céller et al., 2004; Coello et al., 2007; Crespo et al., 2010).

Las microcuencas de Ortigas y Lise están distanciadas considerablemente por lo que, debido a la variabilidad espacial de la lluvia, se justifica la diferencia en la cantidad de la precipitación. En la figura 10 se observa que durante el período de estudio de estas microcuencas, en Ortigas llueve prácticamente el doble que en Lise.

4.2 Balance hídrico general

Se determinó el balance hídrico general con el fin de conocer el porcentaje de precipitación que se convierte en caudal. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6. Balance hídrico general

	Precipitación	Caudal	Evapotranspiración
Ortigas	100%	50-60%	40-50%
Lise	100%	20-30%	70-80%
Pajonal	100%	40-55%	45-60%
Pinos	100%	25-40%	60-75%

La incertidumbre en los valores de la evapotranspiración mediante la fórmula simplificada y mediante el cálculo directo con el método de Thornthwaite presenta un rango de error de entre 5 y 15 %. Sin embargo, debido a que el objetivo de este estudio es valorar efectivamente la disponibilidad del recurso en cada microcuenca, se presentan los rangos de porcentaje en que se encuentra el caudal y la evapotranspiración de cada microcuenca, pues son los parámetros más susceptibles a ser erróneos.

A continuación se presentan los gráficos resultantes del balance hídrico general para cada microcuenca:

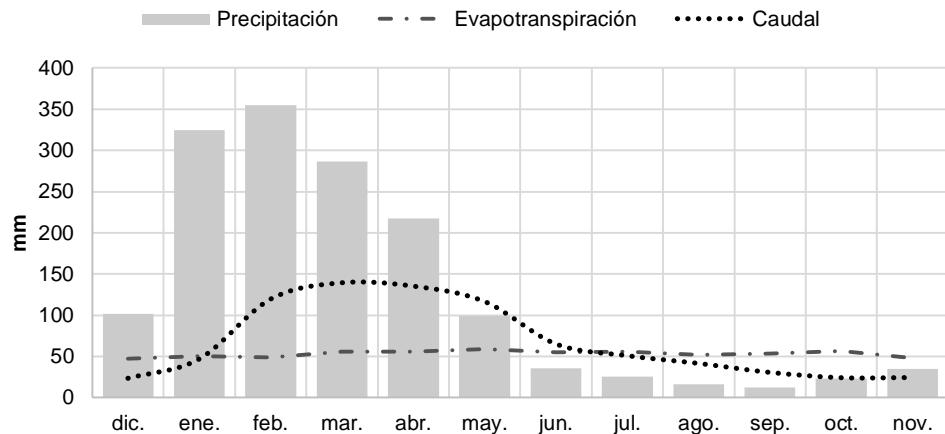


Figura 11. Balance hídrico general de Ortigas

En la figura 11 se observa que el mes promedio más lluvioso en la microcuenca de Ortigas es febrero. El caudal en esta microcuenca representa entre el 50 y 60% de la precipitación media anual de la misma. La existencia de caudal a lo largo de todo el año hidrológico puede identificarse, incluso en los meses más secos.

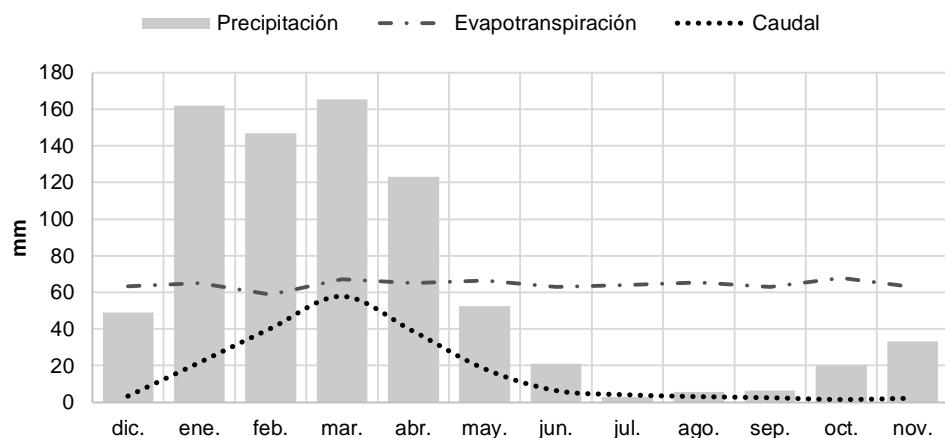


Figura 12. Balance hídrico general de Lise

La figura 12 indica el balance general de la cuenca de Lise, donde el mes promedio más lluvioso es marzo. El caudal representa entre el 20 y el 30% de la precipitación media anual de la misma, lo que advierte del elevado porcentaje de evapotranspiración en esta microcuenca. En los meses de verano se muestra que los caudales son prácticamente nulos, llegando en el mes de octubre a valores cercanos a 0.

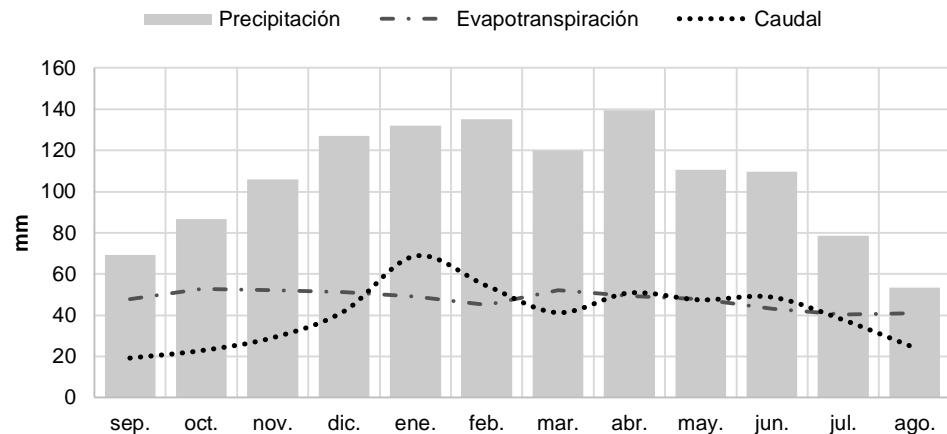


Figura 13. Balance hídrico general de Pajonal

En la figura 13 se observa que el mes promedio más lluvioso en la microcuenca de Pajonal es abril, pero que, a diferencia de Ortigas y Lise, ésta presenta precipitaciones mensuales promedio altas durante todo el año. El caudal representa entre el 40 y el 55% de la precipitación media anual, y en el gráfico se muestra la disponibilidad de caudal durante todo el año hidrológico; en mayor cantidad durante el mes de enero.

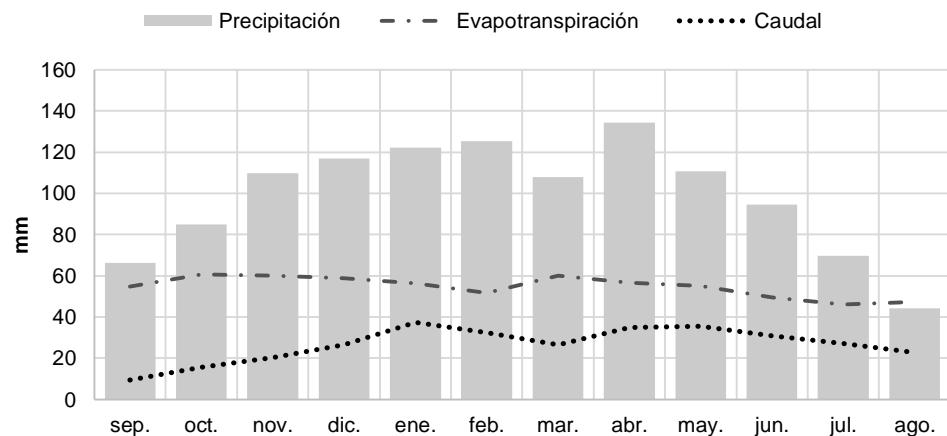


Figura 14. Balance hídrico general de Pinos

En la figura 14 se observa que el mes promedio más lluvioso en la microcuenca de Pinos es abril, igual que en la microcuenca de Pajonal, debido a su cercanía. El caudal representa entre el 25 y el 40% de la precipitación promedio anual de la misma. En general los valores de caudal son más bajos que en la microcuenca de Pajonal, y existe también una mayor evapotranspiración debido fundamentalmente a su cobertura de bosque de Pinos.

Para el período de estudio se establece que las microcuenca que presentan más pérdidas de agua por evapotranspiración son Lise y Pinos. Por otro lado, en las microcuenca de Ortigas y Pajonal la mayoría de la precipitación se transfiere a la microcuenca en forma de caudal.

4.3 Respuesta lluvia-escorrentía

A continuación se presentan los gráficos lluvia-escorrentía generados a partir de las series continuas de precipitación y caudal de cada microcuenca.

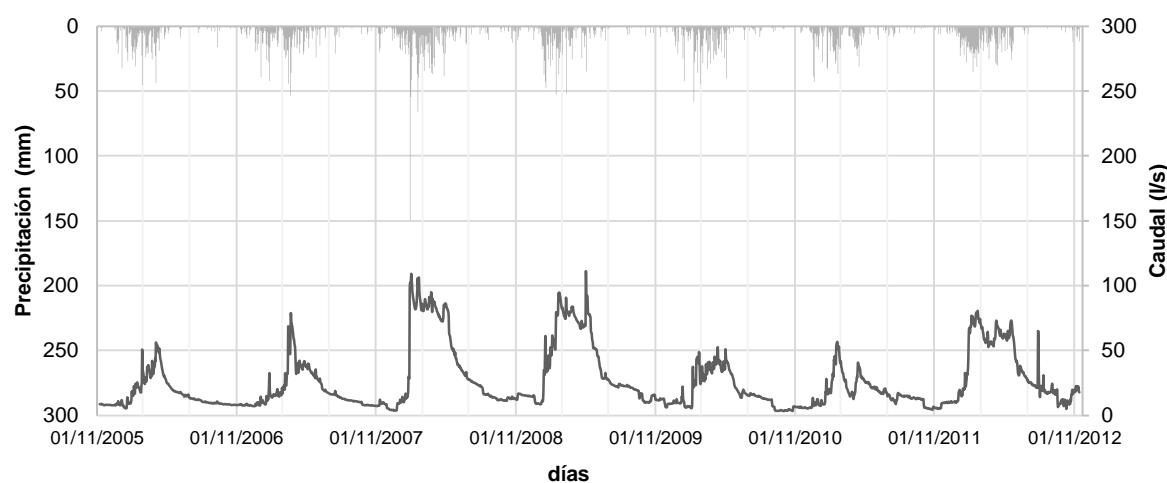


Figura 15. Gráfico lluvia-escorrentía de Ortigas

En la figura 15 se presenta el gráfico lluvia-escorrentía de la microcuenca de Ortigas, que consta con la serie de datos más larga de análisis en este estudio en comparación con el resto de microcuenca, debido a la buena calidad de la información.

En la forma del hidrograma se observa que, a pesar de existir varios meses prácticamente secos debidos al régimen de costa de las precipitaciones, la descarga de agua en esta microcuenca es permanente, sin desabastecer de agua a la zona en época de verano. De la misma manera se distinguen también las estaciones de invierno, caracterizadas en Ortigas por caudales que se mantienen a lo largo de los meses lluviosos con respuesta lenta a los eventos de precipitación.

A lo largo de la serie lluvia-escorrentía se encuentra un evento de precipitación atípico el 28/01/2008, de 150 mm. Este evento provocó grandes crecidas de

caudal durante ese invierno, llegando a superarse los 100 l/s como se muestra en el gráfico. En el invierno de 2009 también se presentan grandes crecidas, similares a las del año anterior, a pesar de no existir ningún evento tan fuerte de precipitación. El máximo caudal que se alcanza este año es de 111 l/s. El resto de estaciones de invierno presentan caudales más bajos.

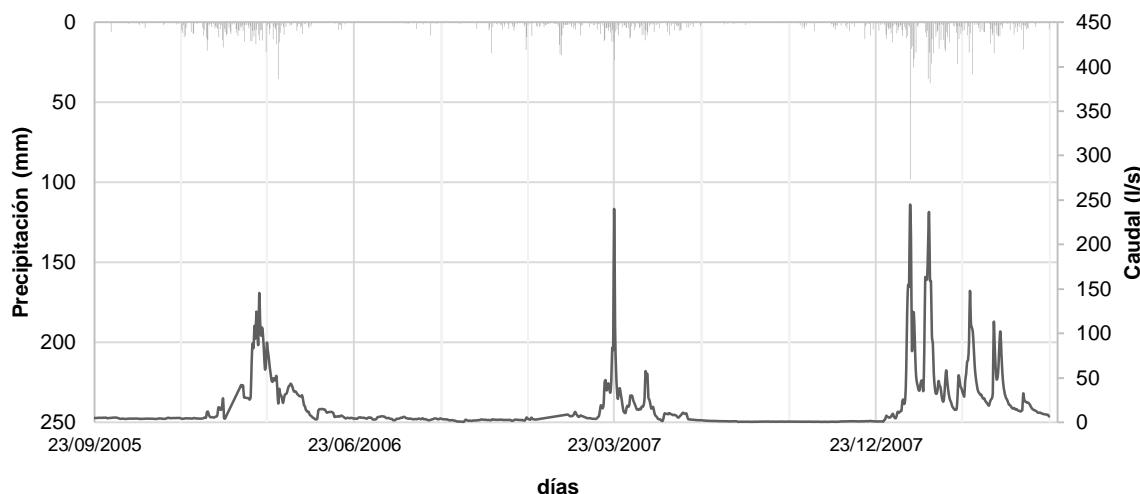


Figura 16. Gráfico lluvia-escorrentía de Lise

La figura 16 muestra el gráfico lluvia-escorrentía de la microcuenca de Lise. Se trabajó con tres años de datos continuos y verificados dada la gran cantidad de vacíos que presentaba el resto de información de caudales, como se indica en el anexo 5.

En la forma del hidrograma se observa que las respuestas a las crecidas de caudal son rápidas, existen caudales altos en invierno pero este flujo se pierde rápidamente. En las estaciones de verano en cambio los caudales son bajos, llegando incluso a valores cercanos o iguales a 0 durante algunos meses.

Un evento atípico de precipitación se da el mismo 28/01/2008, de 98 mm según los equipos instalados de esta microcuenca. El caudal pico consecuencia de esta lluvia llega hasta 244 l/s. Poco tiempo después, el 17/02/2008 se da otra crecida de caudales debido también al aumento de la precipitación, donde el caudal llega hasta 235 l/s.

Comparando los hidrogramas de Ortigas y Lise se observa que en Ortigas el hidrograma tiene periodos de tiempo más largos de caudales altos, a diferencia de los picos puntuales que se presentan en Lise. Esto indica el almacenamiento

de agua que presenta la microcuenca de Ortigas. En cambio en Lise, se registran valores de caudal más altos que en Ortigas, pero este agua es evacuada rápidamente.

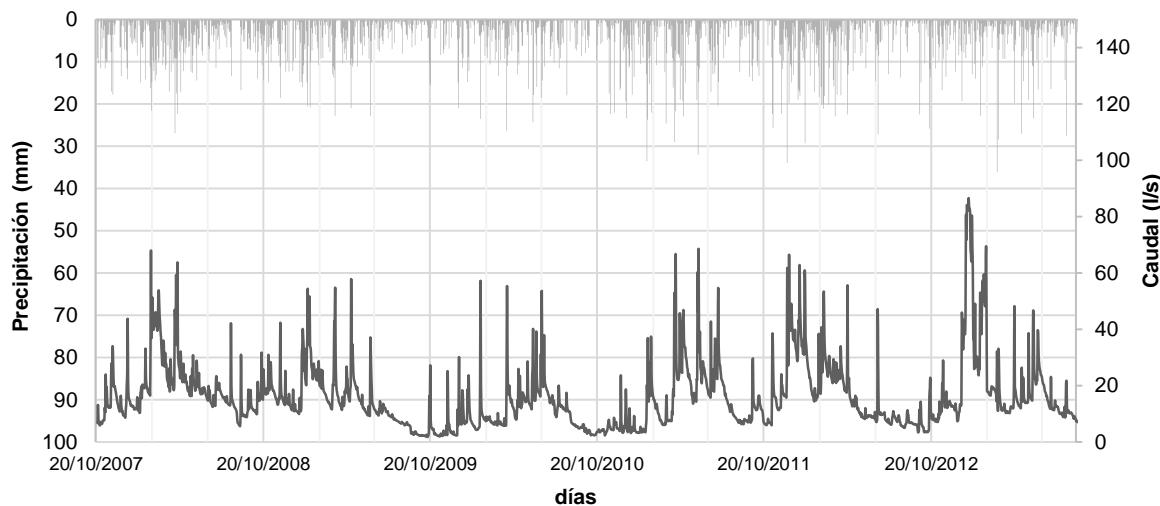


Figura 17. Gráfico lluvia-escorrentía de Pajonal

En la figura 17 se presenta el gráfico lluvia-escorrentía de la microcuenca de Pajonal de 6 años continuos de información.

Debido al régimen de lluvias de la zona, el hidrograma correspondiente a esta microcuenca no presenta una estacionalidad marcada como se podía observar en Ortigas, sino más bien constantes picos en los valores de caudal debido a los eventos de precipitación siempre existentes. La precipitación más alta registrada se da el 13/03/2013, de 36 mm. La mayor crecida de caudal en esta serie se presenta el 09/01/2013, con 84.8 l/s.

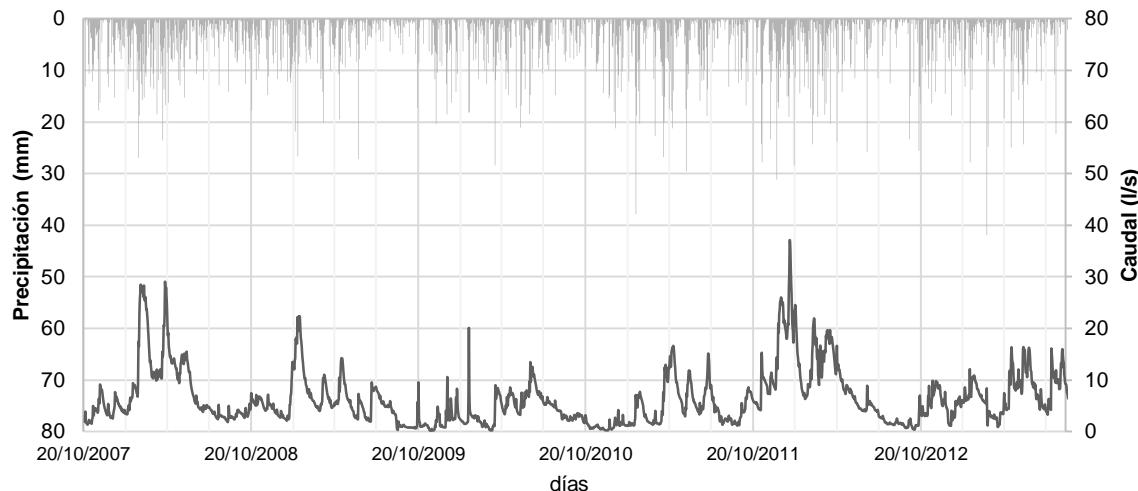


Figura 18. Gráfico lluvia-escorrentía de Pinos

En la figura 18 se muestra el gráfico lluvia-escorrentía de la microcuenca de Pinos, empleando el mismo período de estudio que en la microcuenca de Pajonal.

El hidrograma correspondiente a Pinos, debido también al régimen de precipitaciones oriental, presenta una forma similar al hidrograma en Pajonal. Los caudales son más bajos, y en términos generales no se dan crecidas tan puntuales de caudal como en Pajonal. Además, de la forma de los hidrogramas se determina que los caudales de la microcuenca de Pajonal no tienden a decrecer de manera tan fuerte como en la microcuenca de Pinos.

Una crecida de caudal significativa se presenta el 08/01/2012, con 37.1 l/s, el mismo día en Pajonal se tiene un caudal de 43.3 l/s. El valor de precipitación más alto es el del 13/03/2013, con 42 mm; y su el caudal correspondiente a ese día es de 8.4 l/s.

En las microcuenca de Pajonal y Pinos no se puede reconocer con claridad una época de estiaje en las precipitaciones ya que llueve durante todo el año (Cisneros et al., 2014). También se observa que las intensidades son más bajas que en las otras dos microcuenca.

4.4 Índices hidrológicos

4.4.1 Caudales máximos, mínimos, medios diarios

En la tabla 7 se presentan los valores de los caudales específicos (con el fin de eliminar el parámetro área del análisis) máximo, mínimo y medio a escala diaria de cada microcuenca, determinados a partir de la serie completa de datos de cada una.

Tabla 7. Caudales específicos

	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
Q promedio diario (l/s/km²)	26.9	6.8	16.0	9.5
Q máx. diario (l/s/km²)	112.3	115.6	100.4	77.9
Q mín. diario (l/s/km²)	3.3	0.0	1.4	0.2
Q máx./Q mín.	34	>500	70	337

Los estudios realizados por (PROMAS, 2011) revelan que el caudal específico promedio de la microcuenca de Pinos es de 8.9 l/s/km². Sin embargo, con la nueva serie de datos este valor aumentó ligeramente. Lo mismo ocurrió en los caudales específicos promedios de las microcuenca de Ortigas y Pajonal.

El caudal específico promedio diario más alto se presenta en Ortigas, seguido de Pajonal, Pinos y Lise. En el estudio realizado por (Céller et al., 2004) se revela que el caudal específico mínimo de Pajonal es aproximadamente tres veces más alto con respecto a la microcuenca de Pinos. Con la nueva serie de datos se determinó que el caudal específico mínimo de Pajonal es aproximadamente seis veces mayor al de Pinos.

Se observa que el valor más alto en los caudales específicos máximos se da en Lise, seguido de Ortigas, Pajonal y finalmente Pinos. Por el contrario, el valor más alto de caudales específicos mínimos se da en Ortigas, seguido de Pajonal, Pinos y finalmente Lise, donde este valor llega a ser 0.

En la figura 19 se presenta la relación entre los caudales máximos y mínimos de cada microcuenca:

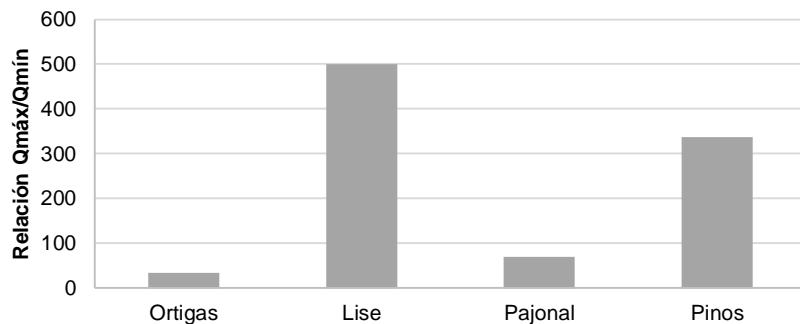


Figura 19. Relación entre los caudales máximos y mínimos

Determinando la relación entre los caudales máximos y mínimos de cada microcuenca, se observa que Ortigas es la microcuenca en la que la diferencia entre su caudal máximo y mínimo es menor, lo que demuestra la menor variación de caudales a lo largo del tiempo. En la microcuenca de Pajonal esta relación también es baja. Por otro lado, en Pinos se muestra que esta relación aumenta, y en Lise se dispara debido a la existencia de caudales nulos durante las estaciones de verano.

4.4.2 Caudales máximos, instantáneos

En la tabla 8 se presentan los caudales específicos máximos instantáneos de cada microcuenca:

Tabla 8. Caudales específicos máximos instantáneos

Microcuenca	Fecha	Hora	P máx. horaria (mm)	P 24h (mm)	Q máx. instantáneo (l/s/km ²)
Pinos	21/06/2007	14:30	10.9	21	445.6
Pajonal	21/06/2007	14:30	10.4	21	479.7
Lise	28/01/2008	22:20	14	100	218.6
Ortigas	28/01/2008	16:00	14.3	150	121.6

Se puede constatar que el día del evento máximo de precipitación es el mismo para las microcuenca de Ortigas y Lise, así como para Pajonal y Pinos. Los caudales específicos máximos instantáneos de las microcuenca de Pajonal y Pinos presentan valores cercanos muy altos. En cambio en Ortigas a pesar de tener un 50% más precipitación durante el evento el caudal máximo instantáneo

específico es menor que al observado en Lise. A más de esto, la precipitación máxima horaria de estos eventos para las microcuencas pareadas es prácticamente la misma y por tanto la comparación de la respuesta hidrológica es válida.

4.4.3 Curvas de duración

Para la comparación entre las cuatro microcuencas se emplearon caudales específicos. En el eje de abscisas de las curvas de duración se muestra la probabilidad de que los caudales sean iguales o excedidos, y en el eje de ordenadas los caudales específicos medios diarios correspondientes a cada porcentaje de excedencia. En la figura 20 se muestran las curvas de duración de las cuatro microcuencas.

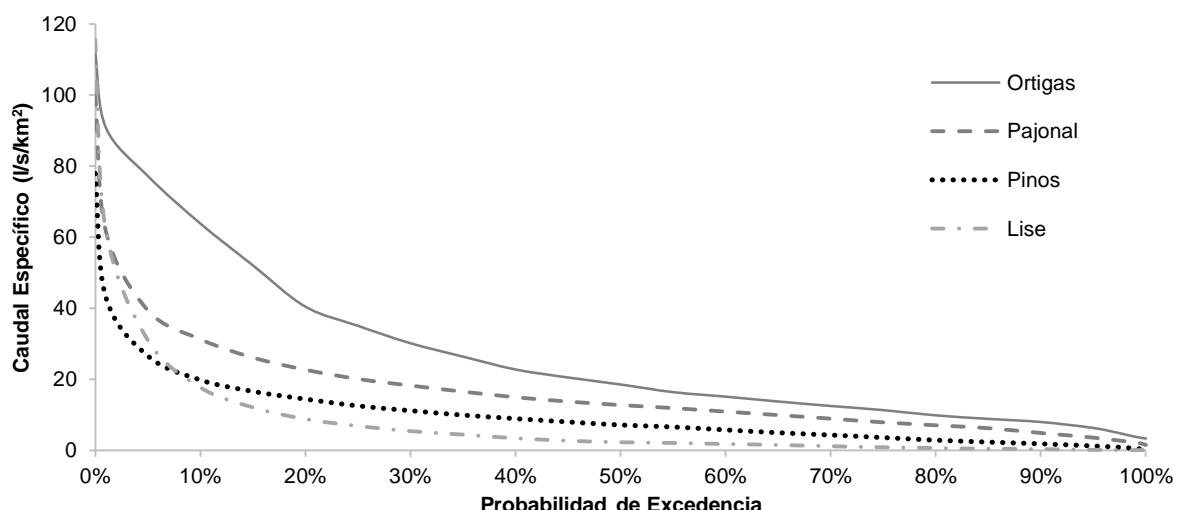


Figura 20. Curvas de duración de caudal

Los valores empleados para graficar las curvas se presentan en el anexo 8.

Se distinguen tres tramos en las curvas de duración: el primero hasta el caudal de garantía del 10%, correspondiente a los caudales altos. El segundo entre el caudal de garantía del 10% y el de 90%, y el último el tramo a partir del caudal de garantía del 90%, correspondiente a los caudales bajos.

Según la forma de las curvas de duración, se observa que la curva perteneciente a Ortigas tiene una pendiente inicial de la curva poco pronunciada, a diferencia del resto de microcuencas. La curva de duración perteneciente a Pajonal

presenta una forma similar a la de Ortigas, pero caudales específicos menores. Presenta una pendiente de la curva más pronunciada que la de Ortigas en el primer tramo. De igual manera, tiene una pendiente poco pronunciada en el siguiente tramo.

Por otro lado en las curvas de Pinos y Lise se presenta una pendiente más pronunciada en el primer tramo de la curva, lo que indica la presencia de caudales altos durante menos tiempo y por lo tanto, respuestas más rápidas a los eventos de precipitación.

A partir los caudales característicos más relevantes de las curvas de duración y relaciones entre éstos presentados en la tabla 9 se podrán realizar comparaciones entre las microcuenca de estudio:

Tabla 9. Caudales característicos de las curvas de duración

	Ortigas	Pajonal	Pinos	Lise
Q_1 (l/s/km ²)	91.01	61.83	43.24	62.14
Q_5 (l/s/km ²)	77.29	39.39	26.60	31.02
Q_{10} (l/s/km ²)	63.89	31.20	19.81	17.67
Q_{35} (l/s/km ²)	26.36	16.44	9.89	4.34
Q_{90} (l/s/km ²)	7.93	4.79	1.81	0.25
Q_{99} (l/s/km ²)	3.75	2.22	0.48	0.00
Q_{90}/Q_{10}	0.12	0.15	0.09	0.01
Q_{90}/Q_{35}	0.30	0.29	0.18	0.06
Q_{99}/Q_{90}	0.47	0.46	0.27	0.00
Q_5/Q_1	0.85	0.64	0.62	0.50

Los caudales específicos más altos de las curvas de duración se dan en Ortigas, seguidos de los de Pajonal, Pinos y Lise, llegando a 0 el Q_{99} en esta microcuenca.

Los caudales específicos altos dependen de la precipitación; por otro lado los caudales específicos bajos dependen de la regulación. Dado que en Ortigas llueve aproximadamente el doble que Lise, se tiene un caudal específico Q_1 mayor.

Comparando los valores de la tabla 7 con la tabla 9 se observa que el Q_{35} de la curva de duración se aproxima mucho al caudal medio de la fuente. La relación de los demás índices y sus resultados serán discutidos en el siguiente capítulo.

4.4.4 Índice anual de rapidez de respuesta R-B

Se calculó el índice de rapidez de respuesta R-B anual (Baker et al., 2004) de los años hidrológicos de estudio de cada microcuenca, que se muestran en la tabla 10:

Tabla 10. Índices de rapidez de respuesta R-B anual

Índice de rapidez de respuesta R-B	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
2005	0.053	0.136		
2006	0.063	0.257		
2007	0.034	0.228		
2008	0.039		0.150	0.087
2009	0.068		0.244	0.173
2010	0.055		0.196	0.123
2011	0.053		0.154	0.083
2012		0.153		0.126

El índice R-B varía año tras año debido a la variación en la precipitación. Informa de los cambios de corto plazo en los caudales diarios con relación a los caudales promedio anuales. Si el índice R-B es cercano a 0, significa que los caudales a lo largo del año hidrológico se mantuvieron más estables. Cuando este valor aumenta, indica mayores fluctuaciones en los caudales a lo largo del año (OEHHA, 2015).

Debido a que en Ortigas este índice es cercano a 0, se entiende que no se producen variaciones abruptas a lo largo del tiempo. De igual manera en Pinos, donde el índice R-B presenta valores más bajos. Por el contrario, los valores más altos del índice R-B son los de la microcuenca de Lise, seguidos por los de Pajonal, indicando mayores fluctuaciones en los caudales.

Si se analiza la tendencia año tras año de estos valores, se puede acotar el comportamiento del caudal en la microcuenca. Si este índice presentara una tendencia creciente a lo largo de los años, significaría que la variación en los caudales cada vez sería mayor, lo que sería signo de disminución en la regulación de los caudales y un posible símbolo de degradación en la microcuenca.

En este caso, no es posible conocer la tendencia del comportamiento de los caudales a futuro debido al tiempo corto de monitoreo, pero se puede tener una primera idea del comportamiento y de las fluctuaciones que se producen en los caudales de las microcuenca de estudio.

4.5 Separación de flujos: modelo WETSPRO

Tras realizar la separación de flujos en el modelo WETSPRO (Willems, 2009) se obtuvieron los valores que se presentan en la tabla 11. Para más detalle acerca de la separación de flujos ver el anexo 9.

Tabla 11. Resultados de la separación de flujos en el modelo WETSPRO

	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
Constante de recesión k correspondiente al caudal base (días)	130	30	60	35
% Caudal Base	83	59	68	63
% Caudal Sub superficial	10	16	14	22
% Caudal Superficial	7	25	18	15

Los resultados de la microcuenca de Ortigas muestran que el porcentaje de caudal base es del 83% y la constante de recesión k es de 130 días; valores superiores al resto de microcuenca.

En la microcuenca de Lise se tiene un porcentaje de caudal base del 59% y una constante de recesión k igual a 30 días. A pesar de tener el mismo régimen de precipitaciones que la microcuenca de Ortigas, la constante de recesión k correspondiente al caudal base es aproximadamente 4 veces menor al valor dado en Ortigas como se muestra en la figura 10 y en la tabla 5.

En la microcuenca de Pajonal el porcentaje de caudal base es de 68% y la constante de recesión k es igual a 60 días, lo que indica que esta microcuenca almacena el agua durante dos meses, aproximadamente la mitad de tiempo que la de Ortigas.

En la microcuenca de Pinos, el porcentaje de caudal base es de 63% y la constante de recesión k es igual a 35 días. A pesar de tener un régimen de precipitaciones similar al de Pajonal, como se mostró en la figura 10 y en la tabla 5, se observa que el tiempo de retención del agua en la microcuenca se reduce aproximadamente a la mitad.

Para una mejor comprensión de los resultados se muestran los siguientes gráficos:

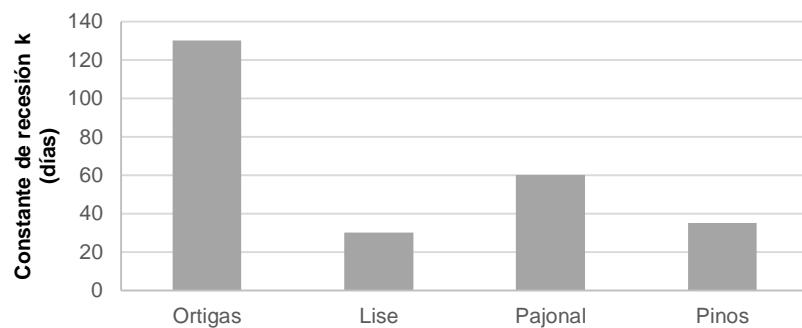


Figura 21. Constante de recesión k correspondiente al flujo base

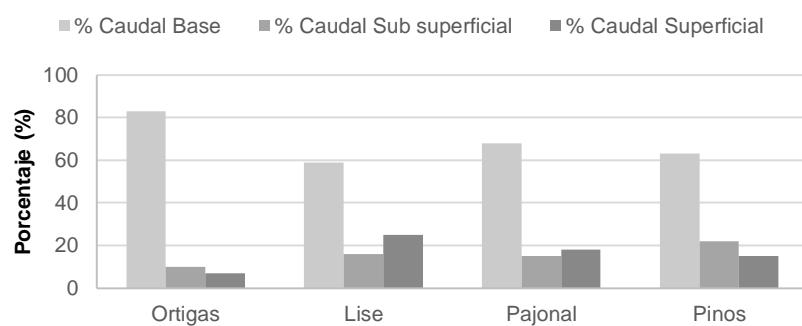


Figura 22. Porcentajes resultantes de la separación de flujos

Los gráficos dados por el modelo WETSPRO (Willem, 2009) se presentan en las figuras 23, 24, 25 y 26.

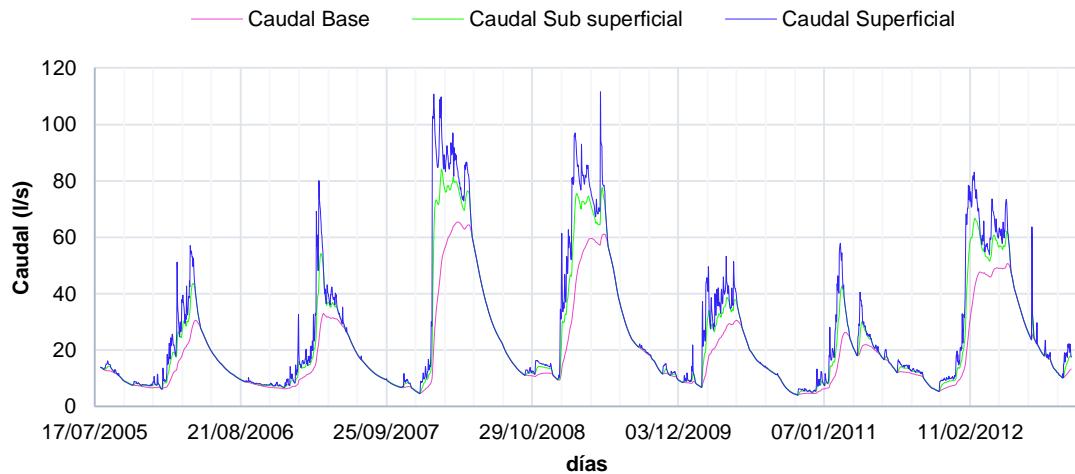


Figura 23. Separación de flujos de la microcuenca de Ortigas

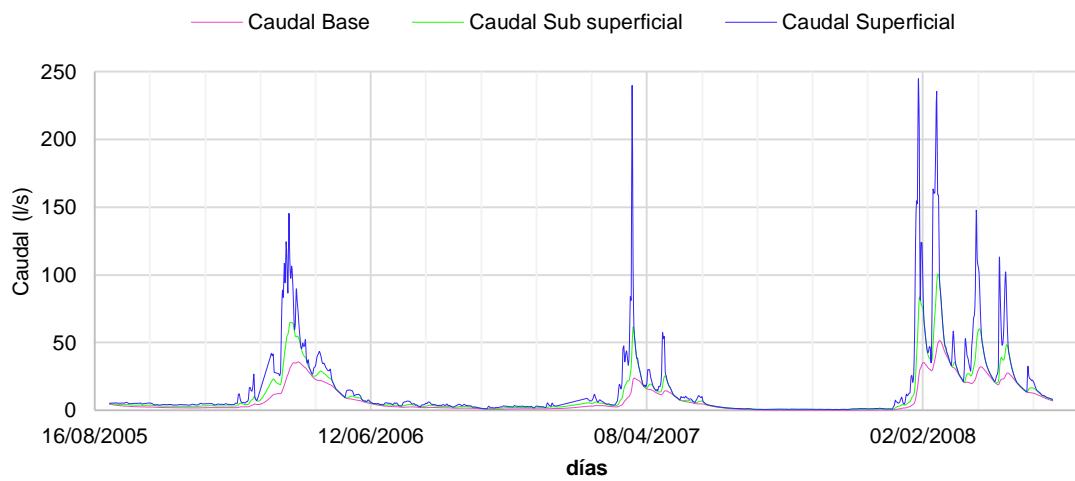


Figura 24. Separación de flujos de la microcuenca de Lise

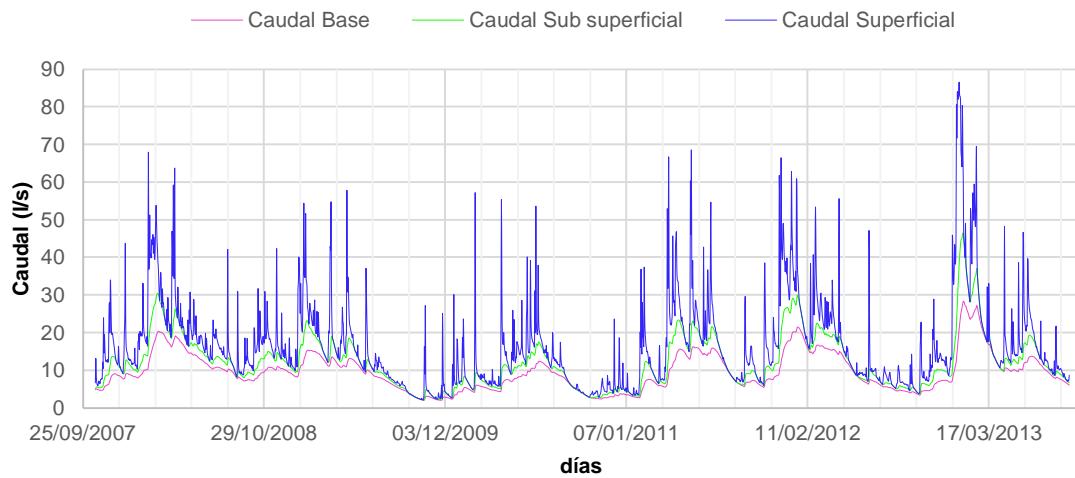


Figura 25. Separación de flujos de la microcuenca de Pajonal

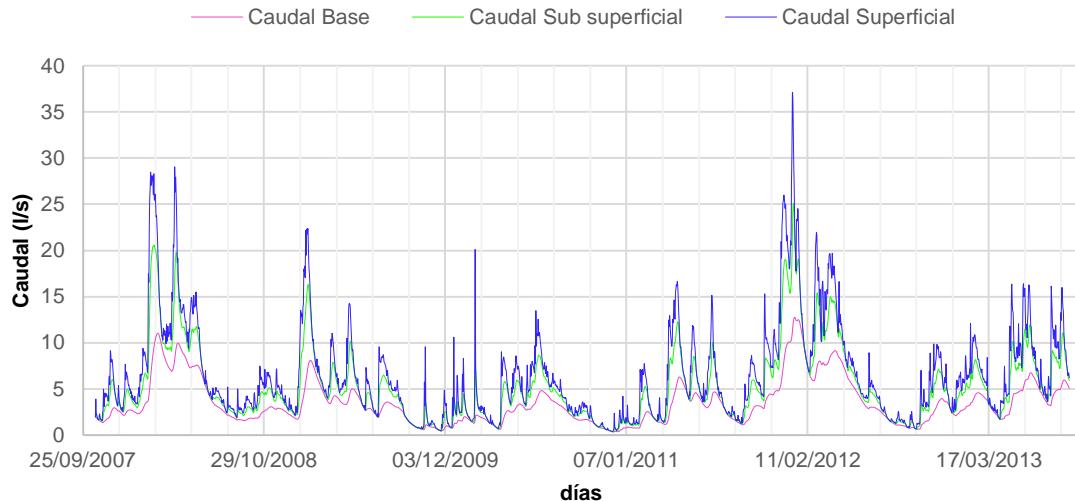


Figura 26. Separación de flujos de la microcuenca de Pinos

5. Discusión

5.1 Microcuenca del río Ortigas

El rendimiento hídrico varía considerablemente dependiendo de las condiciones climáticas, el tipo de la vegetación, su edad y el tipo de actividad (Bosch & Hewlett, 1982). También depende el tipo de área forestada y la densidad de los árboles. Cuando los bosques alcanzan cierto estado de madurez la evapotranspiración tiende a decrecer otra vez (Buytaert et al., 2007). El máximo decrecimiento se presenta típicamente a los 26-30 años de edad de la plantación. La forestación reduce los caudales tanto en estaciones secas como en estaciones húmedas (Farley et al., 2005). Varios autores sugieren que el impacto de la cobertura de bosque varía fuertemente dependiendo del estado en el que se encuentra el ecosistema (Scott et al. 2005; Chazdon, 2008; Hofstede, 2011 citados en Molina et al., 2012).

Debido a la cobertura vegetal de bosque maduro en Ortigas, se justifica la menor necesidad de agua para su vegetación y un porcentaje bajo de evapotranspiración, como se mostró en la tabla 6.

De la forma del hidrograma de Ortigas de la figura 15, se distinguen las estaciones de invierno, caracterizadas por caudales elevados, y las estaciones de verano con descargas importantes de flujo. Tras el evento máximo de precipitación registrado de 150 mm, se observa que ese volumen de recurso no

se evacuó de manera rápida de la microcuenca, sino que fue liberado en forma de caudal regulado a lo largo del invierno.

Con esto se puede corroborar la regulación significativa de caudales en época de estiaje en esta microcuenca, definida en (Cisneros et al., 2007). Esto está relacionado con el tipo de suelos y con la cobertura vegetal de bosque primario natural. Los Andosoles presentan excelentes características de regulación de agua (Coello et al., 2007). Éstos cumplen la función de esponja, y junto con el uso de suelo de Ortigas, permiten la regulación del flujo en la época de verano (Cisneros et al., 2014). En esta capacidad de regulación también influye la alta cantidad de lluvia de esta microcuenca.

De las tablas 7 y 9 se establece que los caudales específicos de Ortigas son más altos que los del resto de microcuenca. El caudal específico máximo es mayor en Ortigas que en el resto de microcuenca dado que la precipitación es también mayor, como se observa en la figura 10. El caudal específico mínimo, en cambio, es un indicador de la capacidad de regulación de las microcuenca. Dado que el caudal específico mínimo de Ortigas es considerablemente mayor en comparación al resto de microcuenca, se verifica también la capacidad de regulación que posee esta microcuenca a pesar de tener un porcentaje de días secos mayor al 40% como se indica en la tabla 5.

La curva de duración de la microcuenca de Ortigas se parece a las curvas de duración para cuencas de llanura, con una pendiente suave al principio y con caudales representativos en verano (Cisneros et al., 2007). Además, en la figura 20 se muestra que los caudales de hasta un 20% de garantía son prácticamente el doble que los de la microcuenca de Pajonal, que es la curva que se encuentra por debajo de la de Ortigas.

De los valores del índice R-B de la tabla 10, cercanos a 0, se corrobora la buena capacidad de regulación que presenta esta microcuenca, puesto que no se presentan mayores fluctuaciones ni variación de este índice año a año.

Tras la separación de flujos, se verificó la existencia de un volumen de agua almacenada en esta microcuenca en los meses de verano, que proporciona un caudal base importante durante todo el año, como se indica en (Cisneros et al., 2014). En la tabla 11 se indica que el 83% del caudal de esta microcuenca

representa caudal base. Además, se obtuvo un valor de la constante de recesión de 130 días. Esto significa que la microcuenca de Ortigas almacena el agua durante más de 4 meses después del evento de precipitación. Esto demuestra la excelente capacidad de regulación y almacenamiento presente en esta microcuenca, comprobado también en (Coello et al., 2008).

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que Ortigas tiene una respuesta más lenta a eventos de precipitación y mayor regulación de caudales, lo que le permite tener una buena capacidad de amortiguamiento ante eventos extremos de precipitación. Se corrobora la afirmación del estudio de (Cisneros et al., 2014), de lo importante que resulta el bosque nativo y la conservación de esta cobertura vegetal con el fin de preservar los recursos hídricos de la zona.

5.2 Microcuenca del río Lise

En la tabla 1 se observa que la microcuenca de Lise es la única que presenta un tipo de suelo diferente. Los Leptosoles están caracterizados por ser suelos poco profundos, y susceptibles a procesos erosivos (PROMAS, 2011). A pesar de tener el mismo régimen de precipitaciones que en Ortigas, la cantidad de precipitación en Lise es prácticamente la mitad como se indica en la figura 2.

En esta microcuenca se presentaron dificultades ya que el caudal en verano es prácticamente nulo durante muchos meses, y debido a que no se ha realizado un inventario en la zona, no se conoce si se han dado o no usos del agua o si existen sistemas de riego que han extraído el agua en épocas de verano.

Tras la realización del balance hídrico, se determinó un porcentaje elevado de evapotranspiración, como se muestra en la figura 12. El elevado porcentaje de pérdida del recurso en esta microcuenca es un símbolo de alteración de la misma.

Si se observa el hidrograma de la figura 16, se determina que las respuestas a los eventos de precipitación en la microcuenca de Lise son rápidas. Las crecidas de caudal son muy puntuales, y el flujo no permanece durante mucho tiempo en la microcuenca. Además, los caudales en las largas estaciones de verano son cercanos a 0. Así, no existe una importante regulación hídrica, puesto que el

caudal se pierde en las épocas secas. Este es otro indicador de que Lise no está en estado óptimo de conservación.

Factores que influyen en la alteración de la microcuenca de Lise son varios. Además de los ya mencionados, el tipo de suelo es otro factor importante, ya que los Leptosoles tienen menos capacidad de retención que los Andosoles. El uso de suelo también, ya que, como se indica en (Crespo et al., 2014), la evapotranspiración aumenta cuando una cuenca es intervenida con pastoreo.

La pendiente influye directamente en la velocidad del flujo de agua (Llambí et al., 2012). La topografía pronunciada que presenta la microcuenca de Lise es otro motivo por el que se pierde un alto porcentaje del recurso en poco tiempo.

Los valores dados en las tablas 7 y 9 muestran que la microcuenca de Lise presenta el caudal específico promedio más bajo, el caudal específico máximo más alto y el caudal específico mínimo igual a 0. Esto corrobora la baja capacidad de regulación que presenta esta microcuenca, puesto que los caudales varían en un rango muy amplio, como también se puede determinar a partir de los valores del índice R-B de la tabla 10.

Una cuenca de montaña degradada presentará el primer tramo de la curva de duración prácticamente vertical y llegará a valores muy bajos en época de verano (Cisneros et al., 2007). En la microcuenca de Lise, como se mencionó en (Cisneros et al., 2007), se observa que la curva de duración presenta una pendiente muy pronunciada en su primer tramo, debido al uso de suelo en la misma predominado por pastoreo. Los caudales mínimos son muy bajos y no existe una adecuada regulación del agua.

En la tabla 11 se indica que el porcentaje de caudal base es del 59% en la microcuenca de Lise. Por otro lado, la constante de recesión es de 30 días, menos de la cuarta parte del valor dado en Ortigas. Existe un valor apreciable de caudal base a corto tiempo, lo que indica que la regulación de flujo en esta microcuenca es pobre. Debido a su cobertura vegetal de chaparro arbustivo, a la poca profundidad del tipo de suelos y a la topografía, se produce un escurrimiento rápido que hace que este flujo base se pierda de la cuenca al poco tiempo.

La cobertura vegetal de chaparro arbustivo retiene una cierta cantidad de agua, pero dada la baja cantidad de lluvia en Lise en comparación con el resto de microcuencas, los suelos no llegan a saturarse. Por esto Lise pierde la cantidad de recurso hídrico del que dispone en menor tiempo.

5.3 Microcuencas de Pinos y Pajonal

Afortunadamente, hasta la actualidad, los páramos del Cajas se conservan bien en comparación con otras regiones del Ecuador (Buytaert et al., 2008)

En el páramo, la topografía por sí misma es la responsable de una elevada capacidad de regulación. El terreno accidentado, principalmente formado por actividad glacial, es el hogar de abundantes concavidades y depresiones locales donde pantanos y lagos pueden desarrollarse (Buytaert et al. 2006).

Las microcuencas de páramo de Pinos y Pajonal presentan el mismo régimen climático e incluso valores de precipitación casi iguales debido a su cercanía, como se muestra en la figura 10. La microcuenca de Pajonal tiene cobertura vegetal natural, caracterizada por pajonales, mientras que la microcuenca de Pinos presenta una cobertura vegetal de bosque de pinos en proceso de crecimiento. Esta es la razón por la que existe una mayor pérdida de agua por evapotranspiración que en la microcuenca de Pajonal, como se indica en la tabla 6 y en las figuras 13 y 14, ya que el bosque requiere absorber mayor cantidad del recurso para su crecimiento.

Por este motivo, la cantidad disponible del recurso en la microcuenca de Pajonal es mayor que en Pinos, como se observa comparando entre los hidrogramas de las figuras 17 y 18. El hidrograma de la microcuenca de Pajonal presenta mayores fluctuaciones de los caudales a lo largo del tiempo, mientras que el hidrograma de la microcuenca de Pinos no presenta tales variaciones. Además, el hidrograma de Pajonal tiene una forma más homogénea, mientras que el de la microcuenca de Pinos presenta decaídas de los valores llegando a caudales casi nulos.

A partir de las tablas 7 y 9 se determina que los caudales específicos de Pajonal son superiores a los de Pinos, llegando incluso a ser 6 veces mayor el caudal

específico mínimo de Pajonal que el de Pinos. Con esto se corrobora la existencia de una mayor producción hídrica en la microcuenca de Pajonal en comparación con la de Pinos, como se establece en (Céller et al., 2004), debida principalmente al mayor consumo de agua por evapotranspiración de parte de los árboles. Los caudales de salida de la microcuenca de Pinos son bastante bajos ya que gran parte de la precipitación es absorbida por el bosque, también indicado en (Cisneros et al., 2014).

De esta manera se evidencia la influencia de la cobertura vegetal descrita en (Coello et al., 2008; Cisneros et al., 2014), ya que los pinos tienen una gran capacidad de retención de agua; y con los resultados obtenidos no se observa una buena regulación del flujo en la microcuenca de Pinos a pesar de estar asentada sobre un suelo de excelentes propiedades para la regulación. La influencia del pino sobre estos suelos, se ve reflejada en una disminución en el contenido volumétrico de agua bastante marcada y con posibles implicaciones en la hidrología de las zonas de páramo (Céller et al., 2004).

La curva de duración de Pajonal presenta caudales específicos mayores a la curva de la microcuenca de Pinos. Por otro lado, presentan una forma de la curva similar, dada la regulación de caudales que presenta la microcuenca de Pinos por su cobertura de bosque. La forma de la curva de duración de Pinos es producto de la mayor evapotranspiración de los pinos, lo cual ocasiona una disminución en el contenido de humedad de los suelos. Es decir, de acuerdo con (Crespo et al., 2010) los suelos permanecen más secos debido a que el bosque de pinos absorbe más agua disponible en la zona de raíces. Una conclusión similar se encuentra en (Buytaert et al., 2007), donde se muestra que la forestación reduce la cantidad de materia orgánica en los suelos debido a una mayor y más rápida descomposición producida por la menor cantidad de agua presente (Crespo et al., 2014).

La relación entre caudales máximos y mínimos de la tabla 7 muestra que el valor de este índice en la microcuenca de Pajonal es aproximadamente 5 veces menor al de Pinos. Esto demuestra una buena capacidad de amortiguación ante eventos extremos de la microcuenca de Pajonal, y además la capacidad de regulación del agua del ecosistema de páramo que indica (Buytaert et al., 2007).

De los valores obtenidos en la separación de flujos dados en la tabla 11 se observa que los porcentajes que representan el caudal base sobre el total del recurso disponible en las microcuenca es similar, con un 68% en Pajonal y un 63% en Pinos. Por otro lado, la constante de recesión es prácticamente el doble en la microcuenca de Pajonal que en la de Pinos, con 60 y 35 días respectivamente.

Además, en las figuras 25 y 26 se corrobora que el caudal base de la microcuenca de Pajonal es ampliamente superior en contraste con el de la microcuenca de Pinos, afirmado también en (Céller et al., 2004; Cisneros et al., 2014), debido a la mayor pérdida del recurso por la cobertura de pinos. Así, se demuestra que la capacidad de almacenamiento y de regulación de la microcuenca de Pajonal es mayor que la de Pinos.

El porcentaje de caudal superficial de la tabla 11 en la microcuenca de Pajonal de 18%, mayor al porcentaje del mismo en Pinos, sugiriendo que el Andosol que predomina en Pajonal está saturado. Como la cobertura vegetal de pajonal evapotranspira menos que el bosque de pinos, los suelos de Pinos tienen menor grado de saturación. Después de cierto tiempo de invierno el suelo se satura, y por esto el caudal superficial rápido ante eventos de lluvia es más alto, ya que el suelo no puede infiltrar más agua. En cambio en Pinos el bosque absorbe más agua, lo que hace que los suelos no estén saturados completamente y el porcentaje de caudal superficial sea menor.

La microcuenca de Pinos, debido a su cobertura de bosque amortigua los eventos máximos (Cisneros et al., 2007). Además, el bosque de pinos implica un mayor consumo de agua y una mayor evapotranspiración. En épocas secas, en cambio, se reducen los caudales a valores cercanos a 0 debido también al mayor consumo del recurso.

5.4 Comparación entre microcuenca

De acuerdo al análisis de los resultados de la presente investigación realizada a partir de caudales específicos, y eliminando el factor área para su análisis,

puesto que todas son microcuencas menores a 2.5 km², se establece que la microcuenca más alterada es Lise, seguida de Pinos, Pajonal y Ortigas.

En las microcuencas de Lise y Pinos hay una mayor pérdida de agua por evapotranspiración, menor regulación, menor estabilidad en los caudales, caudales base mínimos y una menor capacidad de almacenamiento. La microcuenca de Lise tiene además una baja capacidad de amortiguamiento a los eventos extremos de precipitación y una baja regulación de caudales en épocas de verano.

En Ortigas y Pajonal se da la mayor disponibilidad del recurso, debido a que son microcuencas prácticamente inalteradas, y permiten el funcionamiento hidrológico natural de la zona.

Se puede tener una idea del rendimiento hídrico de las microcuencas a través de los caudales específicos mínimos. En las tablas 7 y 9 se muestra que los caudales específicos mínimos en las microcuencas de Lise y Pinos son muy bajos en comparación con las otras dos microcuencas, símbolo de un menor rendimiento. Con esto se define, como se menciona en el estudio realizado por (PROMAS, 2011), que las microcuencas que tienen influencia de actividad humana tienen caudales mínimos bajos, como en este caso se observa en Lise y Pinos.

Los resultados obtenidos en la cuenca de Ortigas verifican el estudio de (Cisneros et al., 2014), pues muestran el efecto beneficioso del bosque nativo en la regulación hidrológica de cuencas hidrográficas, abasteciendo de un volumen significativo de agua en épocas secas.

De los resultados de las cuatro microcuencas se establece una vez más la importancia de preservar el bosque nativo de Ortigas, puesto que a pesar de presentarse una época de verano de 6 meses (a diferencia de las microcuencas de Pajonal y Pinos que tienen un relativo invierno durante todo el año), la cantidad de recurso hídrico disponible por unidad de área en esta microcuenca es importante incluso en las estaciones secas.

La disminución de los caudales altos podría hacer pensar en un control de los eventos de crecida que normalmente producen problemas de inundaciones en

las tierras bajas (Crespo et al., 2014). Sin embargo, analizando las series de tiempo para eventos extremos, cuyos resultados se presentan en la tabla 8, se determina que para eventos extremos de tiempo de retorno determinado la cobertura vegetal no tiene influencia, también verificado en (Coello et al., 2008). En primera instancia se sembraron pinos en la zona de páramo con el fin de amortiguar la respuesta hidrológica ante las grandes crecidas, pero tal y como se indica en estos valores datados del 21/06/2007, apenas existe diferencia entre los caudales específicos máximos instantáneos en Pinos y Pajonal. Ambos resultan caudales muy altos, lo cual significa que para este caso la forestación con pinos no tiene ningún efecto sobre el control de caudales extremos (Coello et al., 2008 citado en Crespo et al., 2014)

Una comparación realizada por (Bathurst et al., 2011) entre las cuencas pareadas de Lise y Panamá, Pajonal y Pinos, muestra que el efecto de la cobertura de bosque en las descargas pico es menos importante a medida que el tamaño del evento de lluvia incrementa. De todas maneras se debe realizar mayor investigación al respecto puesto que (Bathurst et al., 2011) también dice que las pruebas a favor de esta hipótesis son todavía demasiado débiles como para ser concluyentes puesto que también se han encontrado resultados contradictorios. Hay una sugerencia de que la cobertura de bosque tiene un efecto despreciable en las descargas pico para descargas con períodos de retorno de más de 10 años. Como propuso (López-Moreno et al. 2006) la cobertura de bosque podría ser efectiva durante lluvias frecuentes y menos intensas. La literatura también indica el importante papel de la cobertura de bosque reduciendo la erosión del suelo y la generación de sedimentos (Bathurst et al., 2011).

La forma de las curvas de duración depende de los días de caudal cero que presenten (Cisneros et al., 2007). Adicionalmente, los resultados muestran un leve aumento en la pendiente de la curva de duración de caudal para el caso de la cuenca con pinos, lo cual significa una leve disminución en la capacidad de amortiguamiento del suelo (Buytaert et al. 2006b; Buytaert et al. 2007; Crespo et al. 2010). Sin embargo, esta alteración no estaría cambiando la forma del movimiento del agua dentro del ecosistema (Crespo et al. 2011 citado en Crespo et al., 2014).

Comparando la curva de duración de figura 20 de la microcuenca de Ortigas con la de Lise se observa una rotunda reducción de los caudales en Lise. Las curvas de duración de Pajonal y Pinos presentan una forma similar pero Pinos caudales específicos más bajos.

Los caudales específicos altos dependen de la cantidad de precipitación, y no son síntoma de conservación de la microcuenca. Los caudales específicos bajos sí son síntomas de degradación y del rendimiento hídrico que presentan las microcuenca.

De la tabla 9 se obtiene el caudal específico Q_1 de Ortigas es mayor a los valores de Q_1 del resto de microcuenca debido a la gran cantidad de precipitación que se da en ésta. Además presenta un caudal específico Q_{99} alto debido a su gran capacidad de regulación y al mayor caudal base que presenta, como se muestra en la figura 23.

La relación Q_5/Q_1 indica la cantidad que representa el caudal de 5% de garantía respecto al caudal que representa el 1% de garantía. Mientras este valor es más cercano a 1, significa que existen mejores características para atenuación de eventos. Los valores de la tabla 9 indican que la relación mayor de Q_5/Q_1 se presenta en Ortigas, seguido de Pajonal, Pinos y Lise.

La relación Q_{99}/Q_{90} indica la cantidad que representa el caudal de garantía de 99% respecto al caudal de garantía del 90%. Mientras este valor es más cercano a 1, indica una mayor capacidad de regulación de una microcuenca. De la misma manera, los valores de la tabla 9 indican que la relación mayor de Q_{99}/Q_{90} se presenta en Ortigas, seguido de Pajonal, Pinos y Lise.

La relación Q_{90}/Q_{35} se indicó con el fin de relacionar los caudales altos con los caudales medios de cada microcuenca. Igualmente se obtienen valores más óptimos de este índice en la microcuenca de Ortigas, y los valores más bajos se presentan en Lise.

La relación Q_{90}/Q_{10} indica el rango en que varían los caudales mínimos de los caudales máximos. Mientras más cercano a 0 es este valor significa que hay un mayor rango de variación entre estos caudales. En este caso el valor más cercano a 0 se da en Lise, seguido de Pinos, Ortigas y Pajonal. En Pinos se

observa que esta relación es demasiado alta, y en Lise este valor se dispara debido a que los caudales mínimos llegan a ser nulos.

Con esto, se puede decir que Ortigas y Pajonal presentan una excelente regulación de caudales debido a su cobertura vegetal poco alterada. En cambio, en Lise y Pinos se observa su degradación la cual puede incrementarse con el paso del tiempo.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

De las cuatro microcuencas motivo de investigación, Ortigas es la que presenta condiciones hidrológicas óptimas debido a su buena capacidad de regulación de los caudales, respuesta lenta ante eventos de precipitación y buena disponibilidad del recurso incluso durante las estaciones secas.

Los resultados obtenidos tras el balance hídrico general muestran que, en Lise, el caudal representa entre el 20 y 30% del total de agua que llega a la microcuenca. En Pinos, estos porcentajes están entre el 25 y el 40%. Por lo tanto, la cantidad de evapotranspiración en estas microcuencas es alto. Por otro lado, las microcuencas que disponen de mayor cantidad de recurso en forma de caudal son Pajonal y Ortigas, con rangos entre 40 y 55% en Pajonal, y entre 50 y 60% en Ortigas.

Tras el análisis de los procesos hidrológicos de las diferentes microcuencas se determinó que el caudal base en la microcuenca de Ortigas representa el 83% del total de recurso disponible en la microcuenca. En las demás microcuencas la capacidad de regulación de flujo disminuye paulatinamente desde Pajonal hasta Lise. A pesar de tener 6 meses de verano, la microcuenca de Ortigas presenta disponibilidad del recurso durante 130 días después del período de invierno según la separación de flujos realizada en el modelo WETSPRO (Willems, 2009).

Los resultados obtenidos en la microcuenca de Lise muestran la influencia del tipo de suelo y de la topografía en la capacidad de almacenamiento de agua y en la rapidez de respuesta ante eventos de precipitación que tiene una

microcuenca. Ortigas, Pajonal y Pinos, que tienen Andosoles como tipo de suelo predominante, muestran mayor capacidad de retención de sus suelos y entrega de flujo más lenta a lo largo del año. En cambio Lise no presenta dicha capacidad de regulación, y además tiene respuesta rápida ante los eventos, dado que presenta una topografía más pronunciada y suelos menos profundos y con menor capacidad de retención como los Leptosoles.

Tras definir los caudales específicos de las microcuenca de Pajonal y Pinos, se ha podido verificar resultados obtenidos en estudios anteriores (p. e.: Céller et al., 2004; Buytaert et al., 2007; Cisneros et al., 2007; Coello et al., 2008; Crespo et al., 2010), que muestran el impacto negativo de la cobertura vegetal de bosque de pinos en las zonas de páramo. Estas microcuenca tienen un invierno marcado durante todo el año, alimentando con agua de lluvia la matriz del suelo de manera continua.

En Pinos, debido al alto consumo de agua por parte del bosque, la disponibilidad de flujo base es de 35 días, mientras que en su microcuenca vecina, es de 60 días. Esto indica una mayor pérdida del recurso en Pinos debido al consumo de agua que presenta este tipo de vegetación exótica. A pesar de presentarse cierta regulación en los caudales de la microcuenca de bosque de Pinos, con respecto a la microcuenca de Pajonal, se verificó que la cobertura vegetal no presenta ninguna influencia en la respuesta a los eventos máximos de períodos de retorno altos.

La forma de las curvas de duración general de caudales refleja la respuesta hidrológica que tienen las microcuenca del presente estudio. La curva de duración de Ortigas es mucho más aplanada, similar a las curvas de duración de los ríos de llanura. Por debajo de esta se encuentra la curva de Pajonal, seguida por la de Pinos y Lise, indicando el aumento de intervención en las mismas.

Las relaciones Q_{99}/Q_{90} dan una idea de la capacidad de almacenamiento de agua que tienen las cuencas durante épocas lluviosas, para liberarla durante épocas secas. Resultando los valores de esta relación en Ortigas y Pajonal de 0.47 y 0.46 respectivamente, a diferencia del valor en Pinos de 0.27 y de 0 en Lise, se demuestra el hecho que las microcuenca de Ortigas y Pajonal presenten un caudal considerable durante todo el año, incluso durante la larga

estación seca en el caso de Ortigas. Por otro lado, las relaciones Q_5/Q_1 demuestran la capacidad de amortiguamiento que presentan las cuencas frente a eventos máximos de precipitación. Siendo el valor máximo de estas relaciones el correspondiente a Ortigas, de 0.85, se demuestra también la buena respuesta que tiene esta microcuenca ante los eventos máximos. De la misma manera, los valores de estas relaciones disminuyen a 0.64, 0.62 y 0.50 en las microcuenca de Pajonal, Pinos y Lise respectivamente.

6.2 Recomendaciones

En la presente investigación se determinó el balance hídrico general de las cuatro microcuenca únicamente para tener una idea del porcentaje de agua transformado en caudal del que se dispone en cada caso. Debido al error presentado entre los diferentes métodos de cálculo, se recomienda realizar un estudio más a profundidad para conocer con veracidad cómo se comporta el balance hídrico en cada microcuenca.

En la investigación se consideró que el caudal de Lise es real, sin afecciones. Puesto que se presentaron caudales nulos en algunos meses de las estaciones de verano, sería recomendable realizar un inventario para determinar si existen concesiones de agua en esta microcuenca, ya que no se conoce a ciencia cierta los usos que se le da al agua, y podrían estar afectando fuertemente a la valoración hidrológica de la zona.

Se trabajó con series continuas de información de un rango entre 3 y 7 años. Sin embargo se sabe que la variabilidad climática de la zona ha sido un tema de importancia en los últimos años debido a la influencia que tendrían el clima y el impacto humano en la hidrología de las cuencas. Por esto, en futuras investigaciones sería importante aplicar modelos que permitan determinar la influencia del cambio climático en la hidrología de estas cuencas.

Este trabajo ha tomado en cuenta exclusivamente la cobertura vegetal, tipo de precipitación y características morfométricas de las microcuenca de estudio. Naturalmente hay una influencia importante del estado actual del uso de suelos. Los cultivos, la ganadería extensiva y otras actividades antrópicas son factores

adicionales que deberían ser tomados en cuenta para futuras investigaciones, ya que podrían estar alterando también la hidrología de las microcuencas de estudio.

Es importante seguir monitoreando estas microcuencas con la finalidad de tener series históricas de larga duración, y así poder comprobar los resultados de los estudios anteriores, además de conocer la tendencia del comportamiento de los caudales a futuro. Esto permitirá obtener conclusiones determinantes que permitan un mejor manejo de las cuencas hidrográficas en el Ecuador.

7. Referencias

- Abebe, A., & Foerch, G. (2006). Catchment characteristics as predictors of base flow index (BFI) in Wabi Shebele river basin, east Africa. In *Proceedings of Conference on International Agricultural Research for Development* (pp. 1–8).
- Adams, K. N., & Fowler, A. M. (2006). Improving empirical relationships for predicting the effect of vegetation change on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 321(1), 90–115.
- Andrade, L. (2014). Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos. *Revista Politécnica*, 33(1).
- Ataroff, M. (2002). Precipitación e intercepción en ecosistemas boscosos de los andes venezolanos. *Ecotropicos*, 15, 195–202.
- Baker, D., Richards, R., Timothy, T., & Kramer, J. (2004). A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2), 503–522.
- Bathurst, J. C., Iroumé, A., Cisneros, F., Fallas, J., Iturraspe, R., Novillo, M. G., ... others. (2011). Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 1: Field data analysis. *Journal of Hydrology*, 400(3), 281–291.
- Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1), 3–23.
- Bubb, P., & others. (2004). *Cloud forest agenda*. UNEP World Conservation Monitoring Centre.
- Buytaert, W., Céller, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: Propiedades, importancia y vulnerabilidad. Cuenca. Recuperado: http://www.paramo.org/files/hidrologia_paramo.pdf.

- Buytaert, W., Céller, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53–72.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Celleri, R., Cisneros, F., Wyseure, G., & Deckers, S. (2008). Comment on “Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes”(Carol P. Harden, *Geomorphology* 79, 249–263). *Geomorphology*, 96(1), 239–242.
- Buytaert, W., Iniguez, V., & De Bievre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1), 22–30.
- Céller, R., De Biévre, B., & Iñiguez, V. (2004). Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo. *Informe Final. DIUC, Programa Para El Manejo Del Agua Y Del Suelo, Universidad de Cuenca*, 23.
- Céller, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355.
- Cisneros, F., Coello, C., Crespo, P., Bievre, B. De, & Feyen, J. (2007). Análisis de curvas de duración general para determinar el grado de degradación de cuencas hidrográficas. *Revista Anales Universidad de Cuenca*, 71–76.
- Cisneros, F., Sáenz, M., Coello, C., & Pacheco, E. (2014). Evaluación de herramientas de modelización para la toma de decisiones en la revitalización hidrológica y forestal en cuencas de montaña.
- Coello, C., Cisneros, F., & Feyen, J. (2008). Efecto de la Cobertura Vegetal en la Respuesta Hidrológica de Cuencas Hidrográficas. *Revista Anales Universidad de Cuenca*, 65–70.
- Coello, C., Feyen, J., Aguirre, L., & Moraes, M. (2007). Respuesta hidrológica de microcuencas con diferente cobertura vegetal. In *Proceedings of the International Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and Multi-scale Sustainability* (pp. 11–13).
- Crespo, P., Céller, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2010). Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. IAHS Publ*, 336.
- Crespo, P., Céller, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos.

- Crespo, P., Cisneros, F., Torres, P., & Feyen, J. (2008). Analysis of the impact of the scale and quality of catchment information of the predictability of the SWAT semi-distributed hydrological model.
- Cuesta, F., ECOBONA-Intercooperation, P. R., Peralvo, M., & Valarezo, N. (2009). *Los bosques montaños de los Andes Tropicales*. Programa Regional ECOBONA-Intercooperation.
- De Bièvre, B., & Acosta, L. (2012). Ecosistemas altoandinos, cuencas y regulación hídrica. *CONDESAN (Consorcio Para El Desarrollo Sostenible En La Ecorregión Andina)*.
- FAO 56. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma.
- Farley, K., Jobbágy, E., & Jackson, R. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11(10), 1565–1576.
- Farley, K., Kelly, E., & Hofstede, R. (2004). Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 7(7), 729–739.
- Hofstede, R. (1998). Impactos ecológicos de plantaciones forestales. In *II Conferencia Electrónica sobre Usos Sostenibles y Conservación del Ecosistema Páramo en los Andes* (p. 82).
- Hofstede, R. (2011). Un árbol no siempre es más agua: a propósito de las políticas de (re) forestación. *Consorcio Para El Desarrollo Sostenible de La Ecorregión Andina (CONDESAN), Propuestas Andinas*, 3.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Kotei, R., Kyei-Baffour, N., Ofori, E., & Agyare, W. (2013). Changes in the Sumampa streamflow flashiness in the forest-savannah transitional zone, Mampong-Ashant, Ghana 1985-2009. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8.
- Krajenbrink, H. J. (2007). *Application of SWAT for rainfall-runoff modelling in small tropical mountainous catchments in Ecuador*.
- Llambí, L. D., Soto, A., Céller, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*.
- Llorens, P. (2003). La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca. *Revista Ecosistemas*, 12(1).
- Molina, A., Vanacker, V., Balthazar, V., Mora, D., & Govers, G. (2012). Complex

- land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology*, 472, 25–35.
- Morgan, R. P. C., McIntyre, K., Vickers, A. W., Quinton, J. N., & Rickson, R. J. (1997). A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technology*, 11(3), 291–299.
- Niadas, I. A. (2005). Regional flow duration curve estimation in small ungauged catchments using instantaneous flow measurements and a censored data approach. *Journal of Hydrology*, 314(1), 48–66.
- OEHHA. (2015). *Flashiness indicator*. Retrieved from http://oehha.ca.gov/ecotox/drycreek/Flashiness_2015.pdf
- PROMAS. (2011). Modelización hidrológica distribuída como herramienta de soporte de decisiones para restauración hidrológica forestal en cuencas hidrográficas andinas.
- PROTOS-PROMAS. (2008). *Implementación de un modelo hidrológico en microcuencas del río Bulu-Bulu*.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céller, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3), 147–186.
- Thornwaite, C. W., & Holzman, B. (1942). *Measurement of evaporation from land and water surfaces*. US Department of Agriculture.
- Vuille, M. (2013). *El cambio climático y los recursos hídricos en los Andes tropicales*.
- Willems, P. (2004). WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool. *KU Leuven Hydraulics Laboratory, Leuven Belgium*.
- Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 311–321.

Anexos

1. Microcuenca de estudio



Microcuenca de Ortigas. Fuente (PROMAS)



Microcuenca de Lise. Fuente (PROMAS)

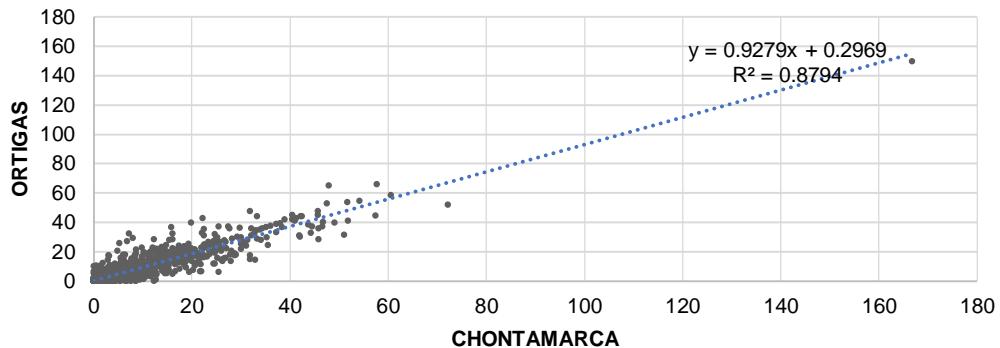


Microcuenca de Pajonal. Fuente (PROMAS)

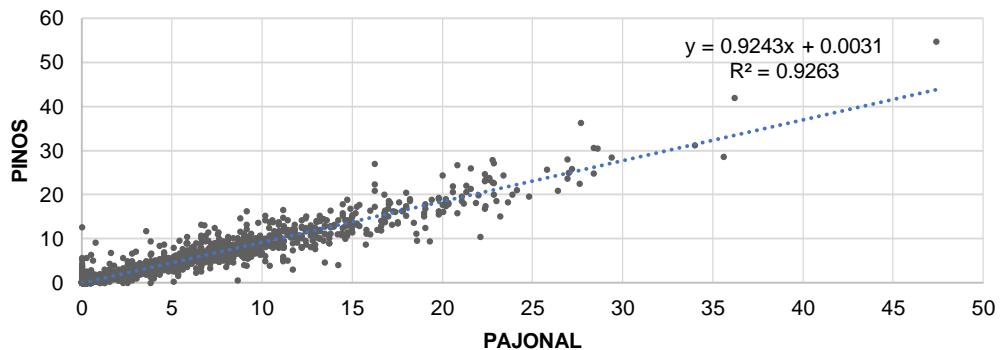


Microcuenca de Pinos. Fuente (PROMAS)

2. Correlación entre pluviógrafos

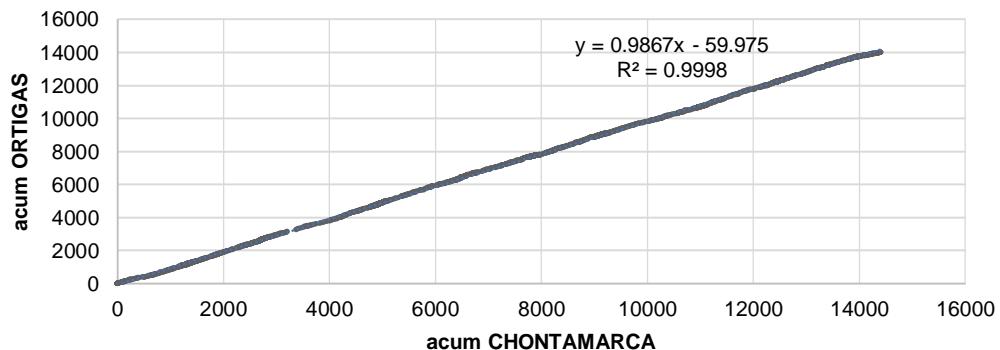


Correlación entre los pluviógrafos de Chontamarca y Ortigas

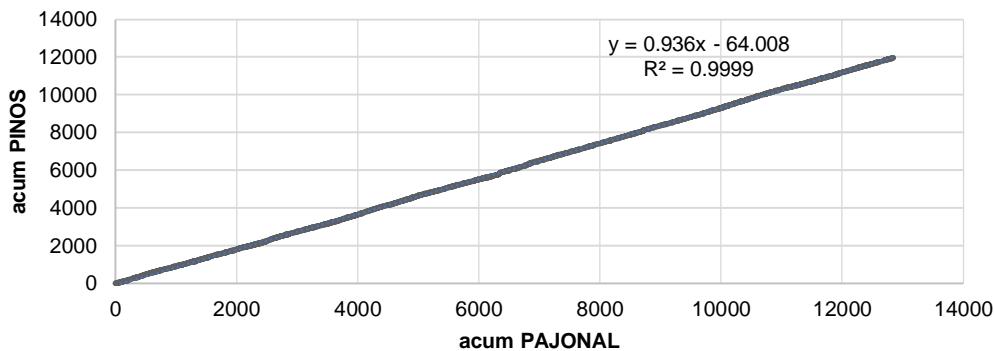


Correlación entre los pluviógrafos de Pajonal y Pinos

3. Curvas de doble masa



Curva de doble masa entre Chontamarca y Ortigas



Curva de doble masa entre Pajonal y Pinos

4. Fechas de información faltante

Información faltante en Ortigas

Caudal	
desde	hasta
15/11/2012	08/02/2013
05/06/2013	24/06/2013
04/07/2014	26/11/2014

Precipitación	
desde	hasta
26/10/2011	03/12/2011
26/08/2013	15/10/2013
11/04/2014	27/11/2014

Información faltante en Pajonal

Caudal	
desde	hasta
25/12/2010	07/02/2011
11/09/2013	24/09/2013
30/12/2013	28/01/2014
12/10/2014	19/11/2014

Precipitación	
desde	hasta
27/03/2010	19/04/2010
29/06/2010	15/07/2010
28/10/2011	15/11/2011
26/12/2014	18/02/2015

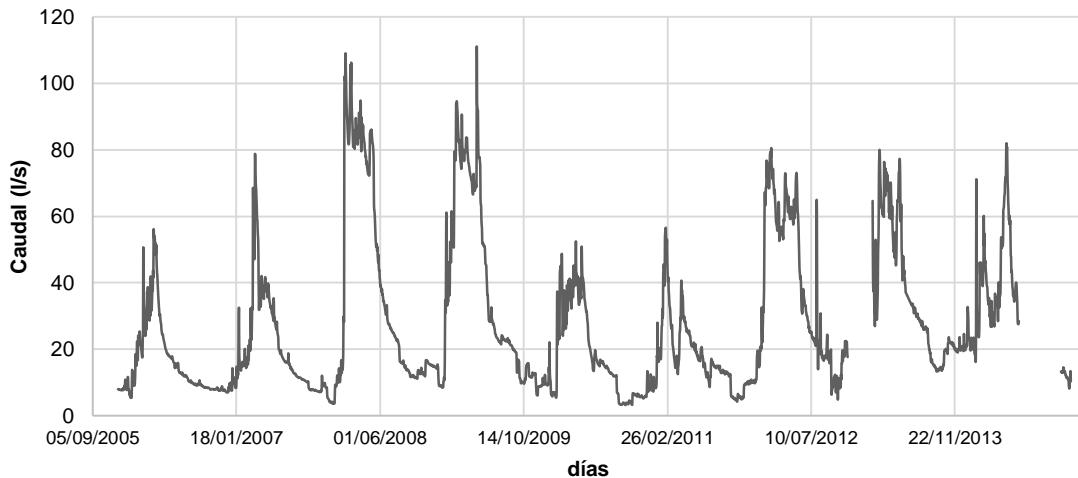
Información faltante en Pinos

Caudal	
desde	hasta
06/12/2009	25/02/2010
30/01/2014	31/01/2014
Precipitación	
desde	hasta
09/02/2011	07/08/2011

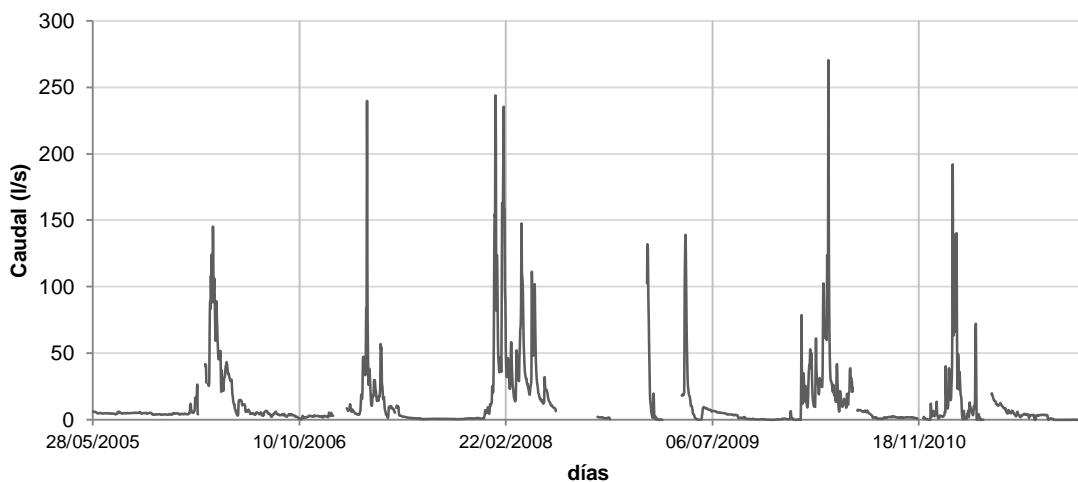
Información faltante en Lise

Caudal	
desde	hasta
08/02/2006	23/02/2006
01/03/2006	03/03/2006
01/01/2007	01/02/2007
23/06/2008	30/09/2008
01/11/2008	28/01/2009
08/03/2009	22/04/2009
06/06/2009	09/06/2009
12/06/2010	21/06/2010
16/11/2010	28/11/2010
09/04/2011	10/04/2011
18/04/2011	18/04/2011
24/04/2011	12/05/2011
14/01/2012	23/04/2012
09/05/2013	09/05/2013
06/10/2013	10/10/2013
01/01/2014	21/01/2014
24/03/2014	29/03/2014
Precipitación	
desde	hasta
20/01/2014	19/03/2014

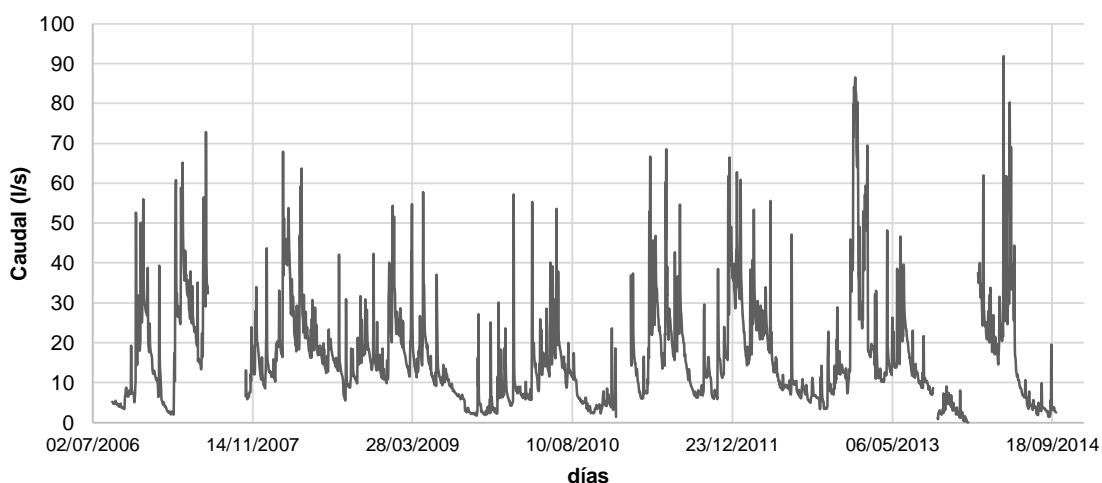
5. Serie completa de caudales medios diarios



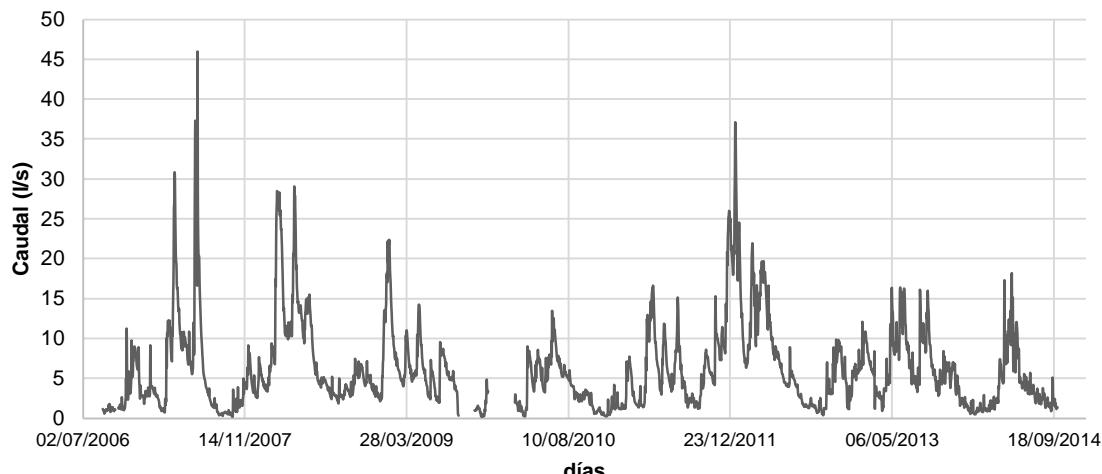
Caudales medios diarios en Ortigas



Caudales medios diarios en Lise

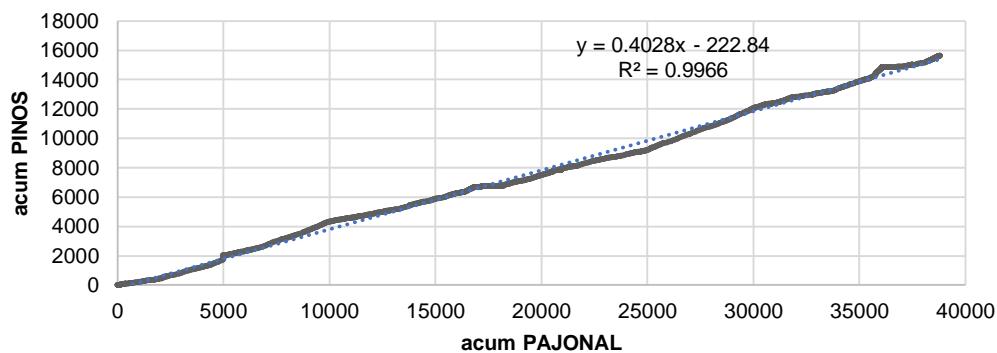


Caudales medios diarios en Pajonal

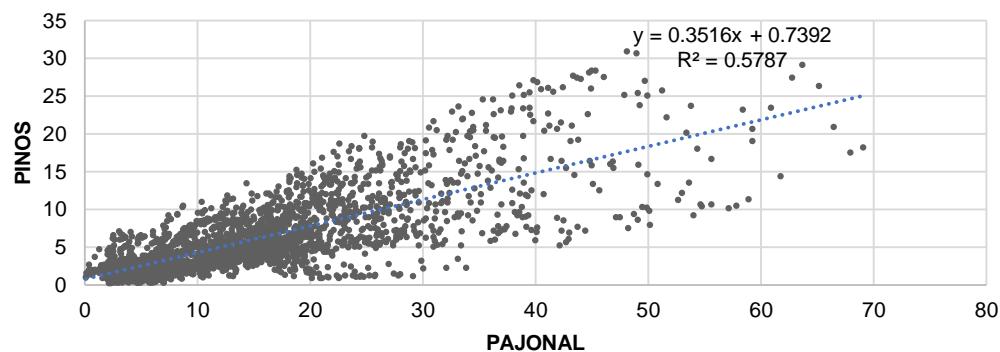


Caudales medios diarios en Pinos

6. Relleno de caudales en Pinos y Pajonal

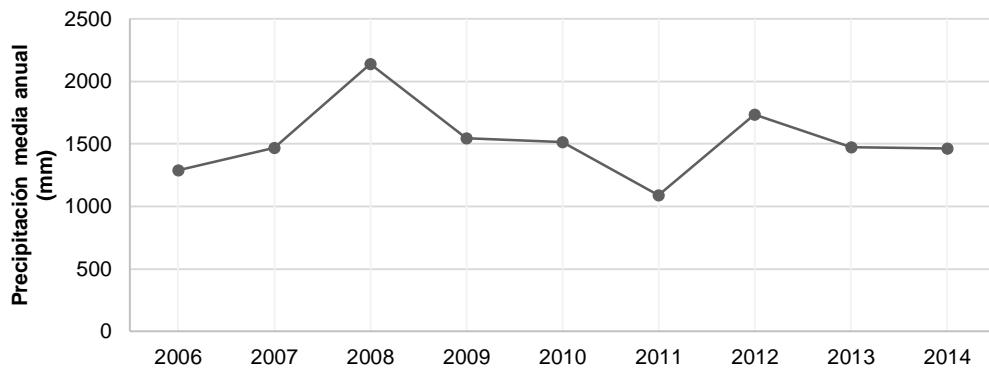


Curva de doble masa entre datos de caudales medios diarios de Pajonal y Pinos

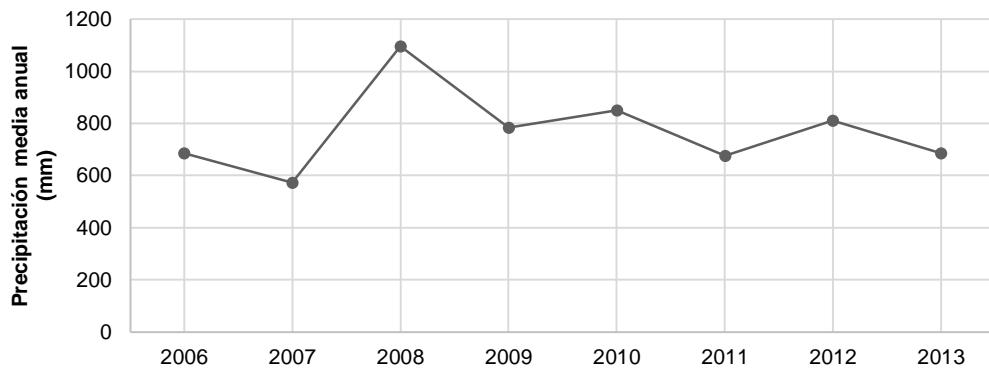


Correlación entre datos de caudales medios diarios de Pajonal y Pinos

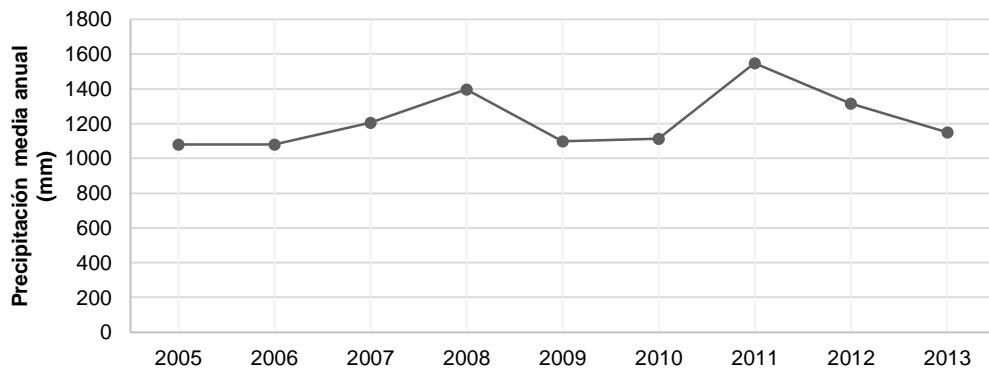
7. Precipitación media anual



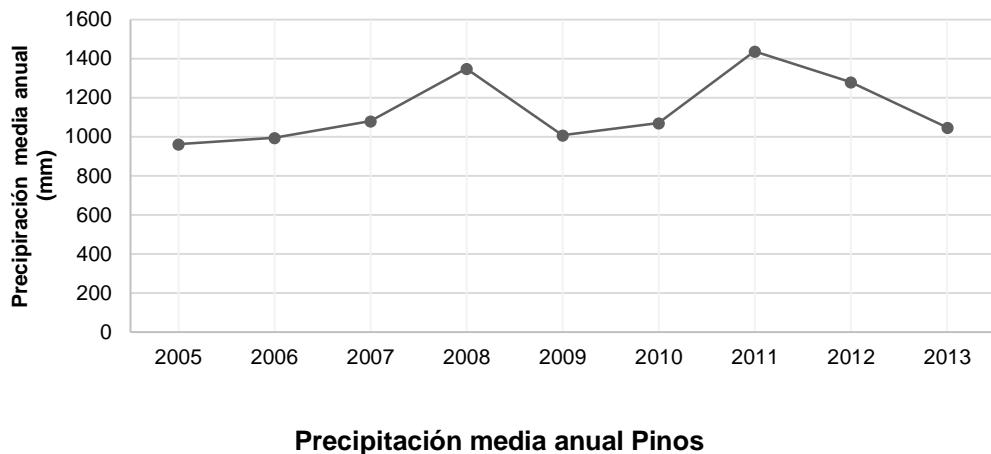
Precipitación media anual Ortigas



Precipitación media anual Lise



Precipitación media anual Pajonal



8. Curvas de duración

Probabilidad de Excedencia	Ortigas	Lise	Pajonal	Pinos
%	l/s/km ²	l/s/km ²	l/s/km ²	l/s/km ²
0	112.25	115.59	100.43	77.93
1%	91.01	62.14	61.83	43.24
5%	77.29	31.02	39.39	26.60
10%	63.89	17.67	31.20	19.81
15%	52.10	12.03	26.04	16.58
20%	40.45	8.72	22.60	14.40
25%	35.04	6.77	20.01	12.50
30%	30.14	5.33	18.15	11.15
35%	26.36	4.34	16.44	9.89
40%	22.74	3.33	14.87	8.91
45%	20.47	2.63	13.64	7.97
50%	18.51	2.19	12.65	7.10
55%	16.35	1.98	11.81	6.55
60%	15.08	1.70	10.81	5.72
65%	13.71	1.43	9.84	4.93
70%	12.44	1.07	8.82	4.28
75%	11.28	0.78	7.79	3.57
80%	9.80	0.57	6.96	2.83
85%	8.81	0.35	6.14	2.29
90%	7.93	0.25	4.79	1.81
95%	6.24	0.06	3.48	1.20
98%	4.44	0.00	2.46	0.75
99%	3.75	0.00	2.22	0.48
100%	3.27	0.00	1.43	0.23

Caudales específicos correspondientes a cada probabilidad de excedencia

9. Parámetros ingresados en el modelo WETSPRO

	BASEFLOW	INTERFLOW	OVERLAND FLOW
Filter parameters:			
constant term [unit of series]:	0		
initial flow value[unit of series]:	14	0	
number of filter steps:	1	1	
recession constant k [number of time steps]:	130	10	1
w-parameter filter [-]:	0.2	0.4	

Parámetros ingresados en la separación de flujos de Ortigas

	BASEFLOW	INTERFLOW	OVERLAND FLOW
Filter parameters:			
constant term [unit of series]:	0		
initial flow value [unit of series]:	5	0	
number of filter steps:	1	1	
recession constant k [number of time steps]:	30	5	1
w-parameter filter [-]:	0.5	0.6	

Parámetros ingresados en la separación de flujos de Lise

	BASEFLOW	INTERFLOW	OVERLAND FLOW
Filter parameters:			
constant term [unit of series]:	0		
initial flow value [unit of series]:	5	0	
number of filter steps:	1	1	
recession constant k [number of time steps]:	60	15	1
w-parameter filter [-]:	0.4	0.6	

Parámetros ingresados en la separación de flujos de Pajonal

	BASEFLOW	INTERFLOW	OVERLAND FLOW
Filter parameters:			
constant term [unit of series]:	0		
initial flow value [unit of series]:	2	0	
number of filter steps:	1	1	
recession constant k [number of time steps]:	35	5	1
w-parameter filter [-]:	0.45	0.4	

Parámetros ingresados en la separación de flujos de Pinos