

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

ALVARO SANTIAGO CONDO CARABAJO
C.I. 0105180475

MAURO ESTEBAN JUELA PALOMEQUE
C.I. 1400739585

DIRECTOR:

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR, PhD
C.I. 0602794406

TUTOR:

ING. MARIO XAVIER GUALLPA GUALLPA
C.I. 0302224068

CUENCA – ECUADOR
JULIO - 2017



RESUMEN

Los ecosistemas naturales andinos como el páramo y el bosque montano alto son los proveedores principales de agua para la región andina del Ecuador. Dichos ecosistemas mantienen flujos de aguas superficiales todo el año y proporcionan agua a los usuarios del recurso, que se encuentran ubicados en las cuencas de los ríos y en las ciudades.

La insuficiente e incompleta información acerca de los servicios hidrológicos de estos ecosistemas de elevaciones altas limitan los esfuerzos efectivos de conservación y de manejo a largo plazo.

En este sentido, el estudio está enfocado en analizar y entender el comportamiento hidrológico de los ríos Tomebamba y Yanuncay. Esto con miras a un mejor manejo y gestión del recurso hídrico, con el objetivo de promover su conservación. Para ello, se contó con datos de lluvia y caudal de trece estaciones, comprendido en el período de enero – diciembre del 2015. Para analizar el comportamiento hidrológico se determinaron diferentes índices hidrológicos tomando como base lo propuesto por la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos - iMHEA.

También se empleó el modelo WETSPRO para la separación de flujos; con los resultados del estudio se actualizó los conocimientos sobre la disponibilidad del recurso hídrico de las cuencas estudiadas y se determinaron diferencias y similitudes en el comportamiento hidrológico de los ríos que servirán para futuras toma de decisiones en materia de conservación de cuencas.

Palabras claves: Balance hídrico, indicadores hidrológicos, caudal base, cobertura vegetal, Tomebamba, Yanuncay



ABSTRACT

Andean natural ecosystems such as the paramo and high altitude montane forest are the main water supply sources for the Ecuadorian Andean region. These ecosystems maintain surface water flows throughout the year and provide good quality water to the people who make use of this resource in river basins.

The insufficient and incomplete information about the hydrological services of these high-elevation ecosystems limits effective conservation and long-term management efforts.

In this sense, the study is focused on analyzing the hydrological behavior of the Tomebamba and Yanuncay rivers. That is, with a view to better management and management of the water resource and with the objective of promoting conservation. For this purpose, one year of rainfall data at thirteen stations was recorded, from January to December of 2015. In order to analyze hydrological behavior, different hydrological indexes were determined, based on what was proposed by the Regional initiative for the Hydrological Monitoring of Andean Ecosystems - iMHEA.

We also used the WETSPRO model to separate flows. The results of the study allowed to bring about new knowledge on the availability of water resources in the basins differences and similarities in the hydrological behavior of the rivers, were determined and will be used for future decision making in watershed conservation.

Key words: Water balance, hydrological indicators, base flow, vegetal cover, Tomebamba, Yanuncay.



Contenido

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1.1 Justificación | 25 |
| 1.2 Objetivos | 27 |
| 2. MATERIALES | 28 |
| 2.1 Descripción de las áreas de estudio | 28 |
| 2.2 Datos | 32 |
| 2.2.1 Origen de los datos | 32 |
| 2.2.2. Recopilación y estructura de datos | 33 |
| 2.2.3 Mediciones de los datos | 35 |
| 3. MÉTODOS | 41 |
| 3.1 Procesamiento de información | 41 |
| 3.1.2. Resumen de los Métodos | 45 |
| 3.1.3. Descripción de las estaciones rellenadas | 51 |
| 3.1.4 Polígonos de Thiessen | 53 |
| 3.1.5 Pendiente media | 54 |
| 3.2 Balance Hídrico | 55 |
| 3.2.1 Precipitación media | 56 |
| 3.2.2 Evapotranspiración (E_{To}) | 56 |
| 3.2.3 Descarga | 59 |
| 3.3 Efecto de la densidad de estaciones sobre el cierre del balance hídrico | 60 |
| 3.4 Indicadores hidrológicos | 60 |
| 3.4.1 Coeficiente de escorrentía | 65 |
| 3.4.2 Análisis de estacionalidad | 65 |
| 3.4.3. Separación de flujos: modelo WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool) | 69 |
| 3.4.4. Tiempo de respuesta | 70 |
| 3.4.5 Rango de descarga | 70 |
| 3.5 Uso de suelo Vs. El comportamiento hidrológico | 71 |
| 4. RESULTADOS | 72 |
| 4.1. Resultados rellenos de datos | 72 |



| | |
|---|------------|
| 4.2. Regímenes de precipitación | 73 |
| 4.3. Balance Hídrico | 76 |
| 4.4 Análisis del efecto de la densidad de las estaciones sobre el cierre del balance hídrico de las cuencas estudiadas | 78 |
| 4.5. Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia | 82 |
| 4.6. Análisis de estacionalidad | 84 |
| 4.7 Indicadores hidrológicos..... | 88 |
| 4.7.1 Precipitación mensual | 88 |
| 4.7.2. Caudales máximos, mínimos, medios diarios..... | 91 |
| 4.7.3 Análisis de disponibilidad hídrica | 91 |
| 4.7.4 Análisis de regulación hídrica | 92 |
| 4.7.5 Índice de caudal Base (Baseflow Index, BFI) calculado mediante WETSPRO..... | 95 |
| 4.7.6 Tiempo de Respuesta (LAG) | 98 |
| 4.7.7 Curva de duración de descarga (FDC) | 101 |
| 4.7.8 Curva de Intensidad - duración de precipitación..... | 102 |
| 4.8 Uso de suelo y cobertura vegetal | 106 |
| 5. DISCUSIÓN..... | 117 |
| Comparación entre cuencas | 117 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 120 |
| 7. RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS..... | 123 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 125 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Características de las cuencas de estudio. Ríos Tomebamba y Yanuncay. .. | 31 |
| Tabla 2. Detalle obtención de datos desde la Universidad de Cuenca y ETAPA EP. .. | 33 |
| Tabla 3. Identificación de las estaciones empleadas en el estudio..... | 36 |
| Tabla 4. Detalle de vacíos de lluvia en las estaciones pluviométricas de las zonas de estudio de Tomebamba y Yanuncay..... | 38 |
| Tabla 5. Series de tiempo de lluvia de la cuenca Tomebamba | 39 |
| Tabla 6. Series de tiempo de lluvia de la cuenca Yanuncay | 39 |
| Tabla 7. Series de tiempo limnimétricas de la cuenca Tomebamba..... | 40 |
| Tabla 8. Series de tiempo limnimétricas de la cuenca Yanuncay | 40 |
| Tabla 9. Series de tiempo meteorológicos de la cuenca Tomebamba..... | 40 |
| Tabla 10. Series de tiempo meteorológicos de la cuenca Yanuncay | 41 |
| Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson en las estaciones pluviométricas – cuenca Tomebamba. | 42 |
| Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre las estaciones limnimétricas – cuenca Tomebamba. | 43 |
| Tabla 13. Coeficientes de correlación estaciones pluviométricas – cuenca Yanuncay.44 | |
| Tabla 14. Distancias entre las estaciones pluviométricas del río Tomebamba en unidades de km. | 53 |
| Tabla 15. Variables y descripción empleadas en los cálculos. | 56 |
| Tabla 16. Presentación de las unidades en que se encuentran las variables en la fórmula de la Evapotranspiración. | 59 |
| Tabla 17. Parámetros e indicadores hidrológicos de disponibilidad y regulación utilizados, para efectuar comparaciones entre las cuencas de estudio | 61 |
| Tabla 18. Regímenes estacionales según la clasificación del SI según Walsh P, Lawler, D..... | 66 |
| Tabla 19. Correlación de los 4 métodos utilizados para rellenar la estación Patoquinoas..... | 72 |
| Tabla 20. Resultados de los diferentes métodos para la estación Patoquinoas..... | 73 |
| Tabla 21. Porcentaje de días con y sin lluvia para las dos cuencas durante el año completo 2015. | 74 |
| Tabla 22. Balance hídrico de las dos cuencas estudiadas..... | 76 |
| Tabla 23. Balance hídrico de las dos cuencas estudiadas..... | 77 |
| Tabla 24. Cálculo del error (%) en el balance hídrico. | 79 |
| Tabla 25. Índice de estacionalidad del año 2015, de cada estación en las dos cuencas estudiadas. | 84 |
| Tabla 26. Comparación del SI, entre los dos estudios (año 2015 y el año 2014)..... | 86 |
| Tabla 27. Precipitación mensual de cada estación en la zona Tomebamba..... | 88 |
| Tabla 28. Precipitación mensual de cada estación en la zona Yanuncay | 89 |
| Tabla 29. Caudal específico promedio, máximo y mínimo de cada cuenca..... | 91 |
| Tabla 30. Indicadores de disponibilidad del recurso hídrico..... | 91 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 31. Percentiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba..... | 93 |
| Tabla 32. Percentiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay | 94 |
| Tabla 33. Comparación de valores máximos-mínimos, P(5)-P(95), de las dos cuencas de estudio. | 95 |
| Tabla 34. Valores de la constante de recesión k caudal base, sub-superficial y superficial..... | 96 |
| Tabla 35. Yanuncay en la fecha 21/04/2015. | 99 |
| Tabla 36. Tomebamba en la fecha 26/04/2015..... | 100 |
| Tabla 37. Valores promedios de las intensidades máximas analizadas en las cuencas de estudio. | 106 |
| Tabla 38. Parámetros de uso de suelo y cobertura vegetal | 115 |
| Tabla 39. Indicadores hidrológicos de regulación y disponibilidad del recurso agua.. | 118 |
| Tabla 40. Descripción de las 16 buenas prácticas en el COOTAD de la ciudad de Cuenca..... | 130 |
| Tabla 41. Áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos en la cuenca Tomebamba. | 134 |
| Tabla 42. Áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos en la cuenca Yanuncay..... | 135 |
| Tabla 43. Porcentajes de pendientes para la cuenca Tomebamba | 135 |
| Tabla 44. Porcentajes de pendientes para la cuenca Yanuncay..... | 136 |
| Tabla 45. Régimen mensual de precipitación de las cuencas Tomebamba y Yanuncay | 137 |
| Tabla 46. Valores de la precipitación promedio ponderada de la cuenca Tomebamba. | 138 |
| Tabla 47. Valores de las intensidades máximas analizadas en las cuencas de estudio. | 138 |
| Tabla 48. Mapas temáticos sobrepuestos utilizados en análisis del comportamiento hidrológico. | 141 |
| Tabla 49. Orden de mayor a menor en las alturas de las estaciones y la precipitación promedio anual obtenida con los polígonos de Thiessen..... | 143 |
| Tabla 50. Orden de las estaciones en altura, relacionando la más alta y la más baja. | 144 |
| Tabla 51. Quintiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba..... | 145 |
| Tabla 52. Cuartiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba..... | 145 |
| Tabla 53. Deciles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba | 146 |
| Tabla 54. Quintiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay..... | 146 |
| Tabla 55. Cuartiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay | 147 |
| Tabla 56. Deciles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay..... | 147 |
| Tabla 57. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Detalle del punto de muestreo – Descargar Final Sustag | 152 |
| Tabla 58. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Evaluación de parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad | 153 |
| Tabla 59. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Detalle del punto de muestreo – Descargar Final Cebollar..... | 154 |



Tabla 60. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Evaluación de Parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad - Descarga Final Cebollar 155

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Ubicación de las zonas de estudio Tomebamba y Yanuncay. Modificación Cartográfica: Autores | 30 |
| Figura 2. Ubicación estaciones hidrometeorológicas de las zonas de estudio. Modificación Cartográfica: Autores..... | 37 |
| Figura 3. Disposición espacial para la completar por razones de distancia. Fuente: (Pizarro, 1993) | 48 |
| Figura 4. Disposición espacial para la completar de datos por promedios vecinales. Fuente: (Pizarro, 1993)..... | 50 |
| Figura 5. Gradiente altitudinal de la cuenca Tomebamba. | 67 |
| Figura 6. Gradiente altitudinal de la cuenca Yanuncay..... | 68 |
| Figura 7. Régimen mensual de precipitaciones de las dos cuencas de estudio..... | 74 |
| Figura 8. Regímenes de datos pluviométricos en la cuenca Tomebamba | 75 |
| Figura 9. Regímenes de datos pluviométricos en la cuenca Yanuncay..... | 76 |
| Figura 10. Balance hídrico de Tomebamba | 77 |
| Figura 11. Balance hídrico de Yanuncay..... | 78 |
| Figura 12. Efecto de la densidad de estaciones en el balance hídrico de la cuenca Tomebamba. Modificación Cartográfica: Autores | 80 |
| Figura 13. Efecto de la densidad de estaciones en el balance hídrico de la cuenca Yanuncay. Modificación Cartográfica: Autores..... | 81 |
| Figura 14. Volumen acumulado de la lluvia de las estaciones de la cuenca de Tomebamba | 82 |
| Figura 15. Volumen acumulado de la lluvia de las estaciones de la cuenca de Yanuncay..... | 83 |
| Figura 16. Índice de estacionalidad de las dos cuencas en referencia a las elevaciones de las estaciones pluviométricas | 85 |
| Figura 17. Mapa de precipitación promedio de las dos cuencas estudiadas. Modificación Cartográfica: Autores..... | 90 |
| Figura 18. Porcentajes correspondientes a la separación de flujos..... | 96 |
| Figura 19. Separación de flujos de Tomebamba..... | 97 |
| Figura 20. Separación de flujos de Yanuncay | 97 |
| Figura 21. Comportamiento del evento extremo en la cuenca de Yanuncay (21/04/2015)..... | 98 |
| Figura 22. Comportamiento del evento extremo en la cuenca de Tomebamba (26/04/2015)..... | 100 |



| | |
|---|-----|
| Figura 23. Curvas de duración caudal | 101 |
| Figura 24. Curva de Intensidad - duración de precipitación Tomebamba..... | 103 |
| Figura 25. Curva de Intensidad - duración de precipitación Yanuncay | 104 |
| Figura 26. Curva de Intensidad - duración de precipitación Yanuncay y Tomebamba | 105 |
| Figura 27. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de las dos cuencas de estudio. Modificación Cartográfica: Autores..... | 107 |
| Figura 28. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca Tomebamba Modificación Cartográfica: Autores..... | 109 |
| Figura 29. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca Yanuncay. Modificación Cartográfica: Autores..... | 110 |
| Figura 30. Mapa de pendientes de las dos zonas de estudio..... | 112 |
| Figura 31. Histograma de pendientes de la cuenca Tomebamba | 113 |
| Figura 32. Histograma de pendientes de la cuenca Yanuncay..... | 114 |
| Figura 33. Dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Tomebamba..... | 132 |
| Figura 34. Dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Yanuncay..... | 133 |
| Figura 35. Dispersión de precipitación entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Tomebamba | 133 |
| Figura 36. Dispersión de precipitación entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Yanuncay..... | 134 |
| Figura 37. Curva de duración-intensidad para cada estación analizada en la cuenca Tomebamba y Yanuncay | 139 |
| Figura 38. Porcentajes de uso de suelo cuenca Tomebamba..... | 139 |
| Figura 39. Porcentajes de uso de suelo cuenca Yanuncay..... | 140 |
| Figura 40. Montado de mapas temáticos como las pendientes, cobertura vegetal, red hidrológica, estaciones (pluviométricas, limnimétricas, meteorológicas), precipitación e isoyetas. | 142 |
| Figura 41. Series de entrada y salida de un modelo de reservorio lineal | 149 |
| Figura 42. Fotografías de los efectos en la ciudad de Cuenca de los eventos extremos registrados en la cuenca Yanuncay | 151 |
| Figura 43. Mapa de ubicación de las Plantas de Agua de Sustag y El Cebollar. Modificación cartográfica: Autores..... | 156 |



ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|-----|
| Ecuación 1. Media Aritmética..... | 47 |
| Ecuación 2. Regresión Lineal..... | 47 |
| Ecuación 3. Método de Razones de Distancia..... | 48 |
| Ecuación 4. Método de la Razón Normal..... | 49 |
| Ecuación 5. Método de Razones Promedios..... | 49 |
| Ecuación 6. Método de Promedios Vecinales..... | 50 |
| Ecuación 7. Polígonos de Thiessen..... | 54 |
| Ecuación 8. Balance Hídrico..... | 55 |
| Ecuación 9. Balance Hídrico sin aportaciones superficiales..... | 55 |
| Ecuación 10. Balance hídrico con variables simplificadas..... | 56 |
| Ecuación 11. Evapotranspiración (ET _o)..... | 57 |
| Ecuación 12. Método combinado de Penman-Monteith FAO..... | 58 |
| Ecuación 13. Análisis de estacionalidad..... | 66 |
| Ecuación 14. Función del modelo de reservorio lineal..... | 149 |
| Ecuación 15. Expresión Algebraica para reemplazar en la ecuación 12..... | 149 |
| Ecuación 16. Expresión algebraica simplificada desde la ecuación 12..... | 149 |
| Ecuación 17. Salida del reservorio donde decrece de manera exponencial..... | 150 |
| Ecuación 18. Descarga de salida para un tiempo (0) y una salida (0)..... | 150 |



CLÁUSULAS DE DERECHO DE AUTOR



UNIVERSIDAD DE CUENCA
CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR

Yo, Alvaro Santiago Condo Carabajo, autor de la tesis "**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMEBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015**", 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 nuestro título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 4 de julio de 2017

.....
Alvaro Santiago Condo Carabajo
C.I. 0105180475



Yo, Mauro Esteban Juela Palomeque, autor de la tesis "**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015**", 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 nuestro título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 4 de julio de 2017

.....
Mauro Esteban Juela Palomeque
C.I. 1400739585



CLÁUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL



UNIVERSIDAD DE CUENCA
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Alvaro Santiago Condo Carabajo, autor de la tesis "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMEBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor,

Cuenca, 4 de julio de 2017

Alvaro Santiago Condo Carabajo
C.I. 0105180475



Yo, Mauro Esteban Juela Palomeque, autor de la tesis "**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y ESTADO ACTUAL DEL RECURSO HÍDRICO EN LAS CUENCAS DEL RÍO TOMBAMBA Y YANUNCAY DURANTE EL AÑO 2015**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 4 de julio de 2017

.....
Mauro Esteban Juela Palomeque
C.I. 1400739585



DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza y perseverancia de luchar por los objetivos e ideales que guían mi vida, a mis padres por su amor, ejemplo de superación, apoyo incondicional, a mis hermanos, abuelitas, tíos y amigos que estuvieron siempre apoyándome en todo proyecto, quienes me permitieron no claudicar hasta alcanzar esta etapa académica-profesional. Muchas Gracias.

Alvaro S. Condo Carabajo

A Dios quien me ha dado la fortaleza para lograr alcanzar esta etapa académica, a mis padres que siempre me apoyaron incondicionalmente, a mis hermanos que fueron el pilar fundamental con su apoyo moral y económico.

A toda mi familia por el aliento que me brindaron día a día en el transcurso de mi carrera universitaria, y de manera especial a mi esposa e hija quienes son la luz que ilumina mi camino. Muchas Gracias.

Mauro E. Juela Palomeque



AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a la Universidad de Cuenca y a su Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales por la apertura y apoyo para la culminación de este proyecto, de manera especial al Dr. Rolando Céleri por el soporte académico y compromiso para realizar este estudio. De igual manera al Ing. Mario Gualpa, por el aporte directo de conocimientos e información necesaria y al Ing. Alex Avilés por su motivación.

Agradecemos también a la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), por brindarnos la información necesaria para realizar el presente estudio.



1. INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas naturales alto andino que presentan un clima tropical generalmente frío y húmedo, se encuentran ubicados entre los 3200 y 4200 m s.n.m., en los cuales se pueden encontrar pajonales, rosetales, arbustales, humedales y pequeños bosquetes (Vásconez & Hofstede, 2006).

En América del Sur, los páramos se extienden desde la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia y la Cordillera de Mérida en Venezuela, hasta Huancabamba en Perú, aportando significativamente a la biodiversidad de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú (Vásconez & Hofstede, 2006).

En el Ecuador, los páramos se encuentran en 18 de las 24 provincias del país, cubriendo una superficie aproximada de 1'337,119 ha, es decir, que ocupan cerca del 5% del territorio nacional. Las provincias que contienen una mayor superficie de páramo son Napo, Azuay y Morona Santiago. Alrededor del 40% de este ecosistema se encuentra en áreas protegidas, por lo cual es necesario identificar más áreas para su protección o crear mecanismos de desarrollo sustentable, principalmente en zonas que pueden ser afectadas por las diferentes actividades antrópicas (Beltrán et al., 2009).

Entre las actividades realizadas por los seres humanos en estos páramos se encuentran: desarrollo de sistemas agropecuarios semi – tradicionales e intensivos, ganadería extensiva e intensiva, forestación con especies exóticas (pinos, eucaliptos) lo cual provoca un cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo, minería a pequeña y gran escala (oro, carbón), cacería, extracción de leña y plantas medicinales, turismo etc. (Chacón, 2003).

Las actividades agrícolas y acuícolas a mediana y gran escala, demandan rubros importantes para la economía ecuatoriana, sin embargo éstas se expanden absorbiendo remanentes de bosques ubicados en la estribación de la cordillera occidental y manglares, lo que provoca que los bosques cercanos a los centros poblados pierdan gran parte de su diversidad biológica, ocasionando que estas áreas sean irrecuperables (Vasco et al., 2012).



El turismo también causa un deterioro ambiental en los páramos. Diferentes actividades como caminatas, camping, navegación sobre lagunas, entre otras, tienen efectos negativos sobre estos ecosistemas, contaminándolo con acumulación de basura, destrucción de bosques para la obtención de leña e incluso incendios, que en varias ocasiones han sido provocados. De igual manera, el acceso de vehículos y motos, principalmente para realizar “deportes” en los páramos, ocasiona que el suelo se deteriore y la vegetación natural se altere. Por esta razón es necesario realizar campañas de concienciación a los turistas, construir infraestructuras con sentido ecológico y evitar actividades en áreas frágiles (Hofstede, 2001).

Una buena planificación territorial en los páramos es fundamental, debido a que se garantizaría la disponibilidad y sustentabilidad de los bienes y servicios ambientales brindados por estos ecosistemas, mediante la aplicación de medidas de prevención, recuperación y protección de los recursos naturales, logrando que los usos de la tierra no afecten a las funciones hídricas y ecológicas del páramo.

Conservar estos ecosistemas en buen estado es de gran importancia, debido a que brindan a los habitantes de las diferentes provincias del país diversos servicios ambientales, tales como: regulación hidrológica, biodiversidad, almacenamiento de carbono en el suelo, entre otros. Además las fuentes de hídricas de los páramos son aprovechadas para el riego, agua potable y energía eléctrica, denotándose así la importancia de conservar estos ecosistemas (Beltrán et al., 2009).

En las ciudades de Quito y Cuenca, agencias de agua, Organizaciones no Gubernamentales (ONGs) y ciertas comunidades, han tenido interés por proteger a los páramos cercanos a estas urbes. El Municipio de Quito, ha creado un fondo destinado a conservar los páramos que cubren sus necesidades de agua. En Cuenca, la empresa municipal de agua potable (Actualmente ETAPA EP) obtiene la concesión del manejo del Parque Nacional



Cajas (PNC) conformado en su mayoría por páramos y del cual nace la principal fuente hídrica de la zona (Vásconez & Hofstede, 2006).

Con el fin de estudiar los ecosistemas, monitorear el cambio climático en el Macizo del Cajas, en el año 2012 se elaboró un expediente con la colaboración de la Coordinación Zonal General – Zona 6 – ACMS del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), el Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio e Integración Dirección Regional 6, la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) Zona 6, el Gobierno Municipal de Cuenca, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), la Deutsche Gessellschaft fuer Internationale Zusammenarbeit (CIZ) y la Corporación Naturaleza Cultura Internacional (NCI), el cuál fue aprobado. La Estación Científica Regional PNC, inició sus actividades en el año 2013, en asociación con la Fundación Alemana para la Investigación (DFG). (Vasco et al., 2012).

Se conoce de una iniciativa de cooperación técnica con Lovaina (Bélgica) para un proyecto de elaboración de una plataforma donde actores locales puedan aumentar el control sobre el acceso a mercados de turismo sostenible. Se cuenta con 16 buenas prácticas de responsabilidad constitucional o comunitaria (Ver tabla 40) verificadas que cubren toda la región, los cuales permiten acciones que incorporan aspectos fundamentales para el desarrollo sostenible. Cuenta con espacios de Coordinación y acción interinstitucional sólidos para implusar y replicar buenas prácticas con las siguientes entidades: Comité Promotor para la declaratoria de una Reserva de Biosfera (Ministerio del Ambiente Regional 6, Ministerio de Relaciones Exteriores y Comercio Regional 6, SENPLADES Regional 6, Gobierno Provincial del Azuay, Municipio de Cuenca, ETAPA EP, Naturaleza & Cultura Internacional y Cooperación Alemana GIZ), Consorcio de la Cuenca del Río Jubones (conformado por 3 Gobiernos Provinciales, 12 Municipios y 64 Juntas Parroquiales), Centro de Excelencia para la Responsabilidad Social Empresarial y Territorial (Corporación Ecuatoriana de Responsabilidad Social, Agencia Cuencana de



Integración Regional, Municipio de Cuenca, ETAPA EP, Cooperación Alemana GIZ, Fundación AVINA), (Vasco et al., 2012).

Según información existente en la página oficial del Parque Nacional Cajas (Ministerio del Ambiente), el páramo de este lugar es considerado un centro de endemismo vegetal y de evolución de muchos taxones. Al menos 16 especies de plantas vasculares son únicas del área, 12 están en peligro de extinción y 4 amenazadas. Además, 71 especies endémicas del Ecuador se encuentran en este lugar. También es uno de los ecosistemas de los Andes del Sur más visitados por miles de turistas, que acuden para disfrutar de sus paisajes misteriosos y de las múltiples expresiones de su cultura (Bièvre, Buytaert, & Iñiguez, 2014).

El Ministerio del Ambiente del Ecuador, junto a entidades públicas como los Gobiernos Autónomos Descentralizados, también han ejecutado acciones de conservación y preservación en el Parque Nacional “El Cajas”, mediante programas de concientización y motivación en las personas para frenar la presión del uso del suelo en los páramos ubicados sobre los 3200 m s.n.m., elevando el valor de la regulación hídrica y fijación de carbono (Vasco et al., 2012).

Las iniciativas de conservación y preservación de estos ecosistemas se surgieron durante los años sesenta, por lo que se conformaron empresas públicas para manejar y controlar las malas prácticas ambientales. Es así, que en el año de 1968, se constituyó la Empresa Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA E.P.) Su acción especializada hizo de Cuenca la ciudad ecuatoriana mejor dotada de agua y alcantarillado; actualmente mantiene el liderazgo nacional del servicio de agua potable, por cantidad y calidad, llegando a servir al 97% de la población urbana y al 67% de la rural (Espinoza, 2010).

La cantidad y calidad del recurso hídrico depende del cuidado de las cuencas, subcuencas y microcuencas de las cuales proviene y sobre todo de las



actividades humanas que en ellas se realiza (Barrera, Alwang, & Cruz, 2010). La disponibilidad de agua durante todo el año es importante para que los pueblos puedan desarrollarse, es por esto que es necesario contar con información que refleje el estado actual de las cuencas en estudio y no caer en problemas de estrés hídrico, que pueden generar riesgos para el desarrollo económico, social y ecológico de las generaciones futuras. Según el informe de Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), el cambio climático afectará a la disponibilidad de agua en las próximas décadas, sobre todo en la producción de alimentos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

Uno de los grandes retos que tienen los países en desarrollo es mejorar la habilidad para implementar sistemas efectivos para “contabilidad del agua”, es decir, contar con información meticulosa del suministro, cuanto se tiene y en que se gasta. De esta forma se puede tomar decisiones informadas para gestionar con mayor eficacia y eficiencia los recursos hídricos, en diferentes situaciones con condiciones cada vez más variables (Jaramillo & Guzmán, 2012).

La cuantificación del agua o información de fuentes hidrológicas en algunos países en vías de desarrollo es muy limitada, es por eso que en nuestro país en 1961, la ley constitutiva del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), instituye la creación del departamento de hidrología, y mediante el acuerdo al Decreto Ejecutivo 405 del 24 de agosto del 2004 se integra el proceso de gestión hidrológica, siendo una de las principales actividades “la ejecución de estudios e investigaciones hidrológicas, hidrogeológicas, sedimentos y calidad del agua, requeridos por entidades públicas y privadas o de acuerdo a las necesidades del país y a lo establecido mediante convenios, contratos, etc.” (Thompson, 2011).

Existe mucha incertidumbre de este tipo de estudios en ecosistemas altoandinos o de páramo (Beniston, 1997), debido a la gran variabilidad de las condiciones meteorológicas en los Andes tropicales y la heterogeneidad de las cuencas (Thompson, 2011). El conocimiento hidrológico puede ser generado



aumentando los sitios de estudio, es por eso, que instituciones como ETAPA EP, desde 1997 inicia con su Red Hidrometeorológica, conformada por 14 estaciones distribuidas en las principales subcuencas hidrográficas del cantón, asumiendo el reto de incursionar en este campo de estudio, con el fin de estar al tanto del comportamiento hídrico de las cuencas y optimizar el manejo del recurso hídrico.

En el año 2014 se modernizó la Red Hidrometeorológica de ETAPA EP. Se instalaron 33 estaciones nuevas, con transmisión de datos a tiempo real; 14 estaciones son limnimétricas, 12 meteorológicas y 7 pluviométricas. Estas estaciones son utilizadas para investigación científica, modelación del comportamiento de lluvias en la ciudad y monitoreo del Parque Nacional Cajas; de esta manera se colabora en la investigación y desarrollo sustentable del cantón Cuenca.

Por ello es importante contar con información adecuada para saber cuál es la condición y cuánto de este líquido vital está disponible. Una manera de evaluar los recursos hídricos es mediante un balance hidrológico, cuyo concepto se deriva de la continuidad o conservación de la masa, es decir, al hecho de que el agua no desaparece ni se “produce”, sino que fluye y cambia de estado debido a los procesos hidrológicos (Célleri, Bièvre, Ochoa, & Villacís, 2013).

El presente estudio está enfocado a analizar el comportamiento hidrológico de los ríos Tomebamba y Yanuncay, por lo que es necesario contar con información de calidad, con la cual se pueda reflejar la realidad de la disponibilidad y calidad del agua de estos los ríos. Para ello, se contará con un año de datos de lluvia y caudal de 13 estaciones, en el periodo de enero – diciembre del 2015. Para analizar el comportamiento hidrológico se determinarán diferentes índices hidrológicos tomando como base lo propuesto por la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos - iMHEA. Como resultados del estudio se actualizará los conocimientos sobre la disponibilidad del recurso hídrico de las cuencas estudiadas y se determinarán diferencias y similitudes en el comportamiento hidrológico de los ríos.



Un análisis importante que se realizó es el cálculo del balance hídrico, ya que es el equilibrio de todos los recursos hídricos que intervienen en una cuenca hidrográfica, representando entradas y salidas de agua en un cierto periodo de tiempo. La determinación del balance hídrico nos permite realizar un cálculo indirecto de cualquier componente desconocido como es la evapotranspiración, caudal y lluvia, además nos puede proporcionar información muy importante para el manejo de recursos naturales (Doorenbos & Kassam, 1979), como por ejemplo el rendimiento hídrico de las cuencas, la estrecha relación con la lluvia, vegetación, suelo y topografía llevan a un adecuado análisis sobre predicción de inundaciones, efectos de sequías, cantidad y calidad de agua (Jothityangkoon, Sivapalan, & Farmer, 2001).

A esto se le suma la fuente de alimentación que es la precipitación (P), quien es la que suministra el recurso agua para los procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica (Jaramillo & Guzmán, 2012). Para realizar las mediciones en campo se toma en cuenta el número como la posición de los pluviómetros con respecto al área analizada (UNESCO, 2006). Además en un balance hídrico lo que entra tiene que salir; por ello calculamos la descarga y evapotranspiración ya que son datos importantes en el cálculo, este valor de la descarga depende de la precisión de la medida del sensor de nivel y de la calibración de la curva de descarga (UNESCO, 2006). El caudal específico determinado es la relación entre el caudal y el área de una cuenca en estudio (Q/A) (Jaramillo & Guzmán, 2012). La Evapotranspiración (E), es la variable más incierta por la dificultad que tiene en el proceso de medición, un método tradicional es el de evaporación de la bandeja. En el estudio de "Identificación de los controles de la respuesta de lluvia y escorrentía de las cuencas pequeñas en los Andes Tropicales del Ecuador" (P. J. Crespo et al., 2011), cita el término de la diferencia del balance hídrico se aproxima a la evapotranspiración real, es decir que en la práctica los cultivos crecen en condiciones de humedad muy lejanas a las óptimas, por lo que ésta toma en consideración el agua disponible en el suelo y las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla un cultivo determinado, esto representa la cantidad real



de vapor de agua que se transfiere hacia la atmósfera, en condiciones determinadas, dependiendo de la disponibilidad de agua para satisfacer la demanda evapotranspirativa, en el caso de la vegetación de la capacidad para extraer humedad del suelo.

En el caso más teórico de condiciones óptimas, se despliega el concepto de evapotranspiración potencial E_{TO} , este valor es el que obtiene si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas, es decir, que en dichas condiciones se produjera el máximo de transpiración y que coincidiera con las óptimas condiciones de crecimiento de las plantas.

Para una comprensión del comportamiento hidrológico y para poder establecer características físicas comparativas entre las cuencas de estudio, se realizó la aplicación de indicadores hidrológicos, que permiten aprender sobre los procesos y fenómenos físicos que ocurren en las cuencas hidrográficas (Sokolov & Chapman, 1981). Para determinar la regulación de las dos cuencas es necesario conocer parámetros como: precipitación mensual y anual, caudal específico mensual y anual, la diferencia entre precipitación y caudal, y el coeficiente de esorrentía; que son importantes para poder conocer la realidad de cómo se encuentran estas cuencas (Ochoa, Fitzimons, & Bièvre, 2012).



1.1 Justificación

Los diversos servicios ambientales que los páramos de los Andes brindan a la humanidad permiten utilizar el agua para la generación de energía hidroeléctrica, agricultura a través de regadío, usos domésticos, industriales, ecoservicios (Céleri & Jan, 2009). Sin embargo los seres humanos no le damos la importancia adecuada para gestionarlos y desarrollarlos moderadamente, lo que nos dirige hacia una pérdida de biodiversidad, distorsión en la capacidad de regulación del recurso agua, por ello es necesario efectuar estudios de investigación sobre precipitación más a fondo, con el fin de realizar proyecciones, modelaciones, simulaciones climáticas futuras de mejor calidad (Mora & Willems, 2012), que estimulen la conscientización sobre la importancia de cuidar las fuentes hídricas.

La información y conocimiento exacto sobre la distribución espacio – temporal la variación sobre los patrones de precipitación en los Andes ecuatorianos aún es incompleta (Rollenbeck & Bendix, 2011). Adicionalmente los datos de monitoreo son limitados y de baja calidad, muchas veces nos coloca en una situación difícil de análisis y evaluación de los fenómenos naturales en cuanto a la cantidad y tiempo de precipitación (Padrón, Wilcox, Crespo, & Céleri, 2015). A pesar de todo esto la mejor opción es seguir mejorando el monitoreo para lidiar con la incertidumbre que se presenta por falta de entendimiento de los procesos físicos que ocurren en la naturaleza, estimación de parámetros y de los instrumentos de monitoreo (Pedersen, Jensen, Christiansen, & Madsen, 2010).

En este contexto, este estudio es para identificar el comportamiento hidrológico que ocurre actualmente en nuestras cuencas analizadas, levantar información referencial en cuanto al cuidado de las fuentes hídricas, para entregar datos científicos, que consiste en la recopilación de análisis de la aplicación de métodos estadísticos, estocásticos que sirvan para el relleno de datos, con el propósito de continuar con las series históricas para la Red Meteorológica ubicada en las áreas de estudio Tomebamba y Yanuncay. Contar con un adecuado registro completo de caudales y lluvia radica en que esta información formará parte de la base de datos sobre la cual se calcula el balance hídrico, es



una herramienta muy importante porque servirá para análisis meteorológicos que permitirá mejorar los sistemas de riego, prevenir desbordamientos de ríos, planificar obras civiles, creando una base línea de información para futuras investigaciones, aportando al conocimiento para la Universidad de Cuenca y ETAPA EP.

Al tener un mayor conocimiento con la información útil obtenida, servirá para diferentes proyectos locales, en alertas, control de incrementos de caudales, mediciones climatológicas para proyectos de reforestación, manejo de cuencas hidrográficas, análisis de hidroeléctricas, estudios sobre el cambio climático, e inundaciones en los ríos de la ciudad de Cuenca y a entender mejor los efectos de los impactos ambientales en la actualidad, mismos que pueden ser prevenidos y en algunos casos remediados.



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Realizar un análisis del comportamiento hidrológico y estado actual del recurso hídrico en las cuencas del río Tomebamba y Yanuncay durante el año 2015.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar la regulación hídrica de las cuencas a partir de estudios de balance hidrológico.
- Identificar similitudes y diferencias en la respuesta hidrológica en las cuencas de los 2 ríos Yanuncay y Tomebamba.



2. MATERIALES

2.1 Descripción de las áreas de estudio

El proyecto se ubica en las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay, Provincia del Azuay, Cantón Cuenca. Parte de las cuencas estudiadas forman parte del Parque Nacional “El Cajas” ubicado al noroccidente de la ciudad de Cuenca. Posee una topografía montañosa con una altura entre los 2600 m s.n.m. – 4450 m s.n.m.

El PNC es parte del Patrimonio de Áreas Naturales del Estado Ecuatoriano (PANE), posee la categoría de mayor jerarquía del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), que permite su aprovechamiento sustentable a través del ecoturismo, investigación científica y conservación para servicios ambientales. Es conocido como fuente de agua de los afluentes de los ríos Tomebamba, Mazán, Yanuncay y Mingüir, abasteciendo de agua potable a la ciudad de Cuenca (Dirección de Planificación, 2015), además se distinguen cuatro tipos de formaciones vegetales: bosque de neblina montano alto, bosque siempre verde montano alto, páramo herbáceo y herbazal lacustre montano, su temperatura oscila entre los -2 a 18°C con una precipitación que fluctúa entre los 1000 – 2000 mm (Astudillo, Tinoco, & Siddons, 2015).

El río Tomebamba cuenta con una gradiente altitudinal en el rango de 2600 m s.n.m – 4300 m s.n.m., y tiene su origen en el límite norte del PNC, en el sector denominado como Tres Cruces (estación de monitoreo Toreadora), es una zona cercana a la Laguna Toreadora, punto considerado como el de mayor altitud en nuestro estudio. Este río atraviesa hasta el noroeste de la ciudad de Cuenca por la zona de Balzaín (estación de monitoreo Matadero Sayausí), punto considerado como el más bajo de monitoreo en nuestro estudio, luego de circunvalar el centro histórico de la ciudad, llega a unirse con el río Machángara formando el río Cuenca, este efluente llega a unirse con el río Santa Bárbara en la Parroquia El Cabo perteneciente al Cantón Paute, formando así el río Paute, cuyas aguas luego de seguir su curso, y encuentros con otros efluentes



llegan hasta el río Amazonas y este a su vez desemboca en el Océano Atlántico (Tapia, 2016).

El río Yanuncay tiene una gradiente altitudinal en el rango de 4000 m s.n.m y 2500 m s.n.m. se origina en el sur del PNC, en nuestro estudio la estación más cercana al punto de origen de este efluente es la estación de monitoreo Izhcayrumi, así mismo el punto más bajo de monitoreo es en Yanuncay A.J. Tarqui. Este río atraviesa la ciudad de Cuenca hasta juntarse con el río Tarqui cerca de las calles Francisco Moscoso y 24 de mayo de la ciudad, este efluente desemboca luego en el río Tomebamba en el sector de la Empresa Eléctrica Cuenca, que posteriormente se unen al Machángara formando el río Cuenca; es decir que el efluente de la cuenca Yanuncay también llega al océano Atlántico (Maza, 2016).

A continuación se puede observar en la Figura 1 la ubicación de las zonas de estudio.

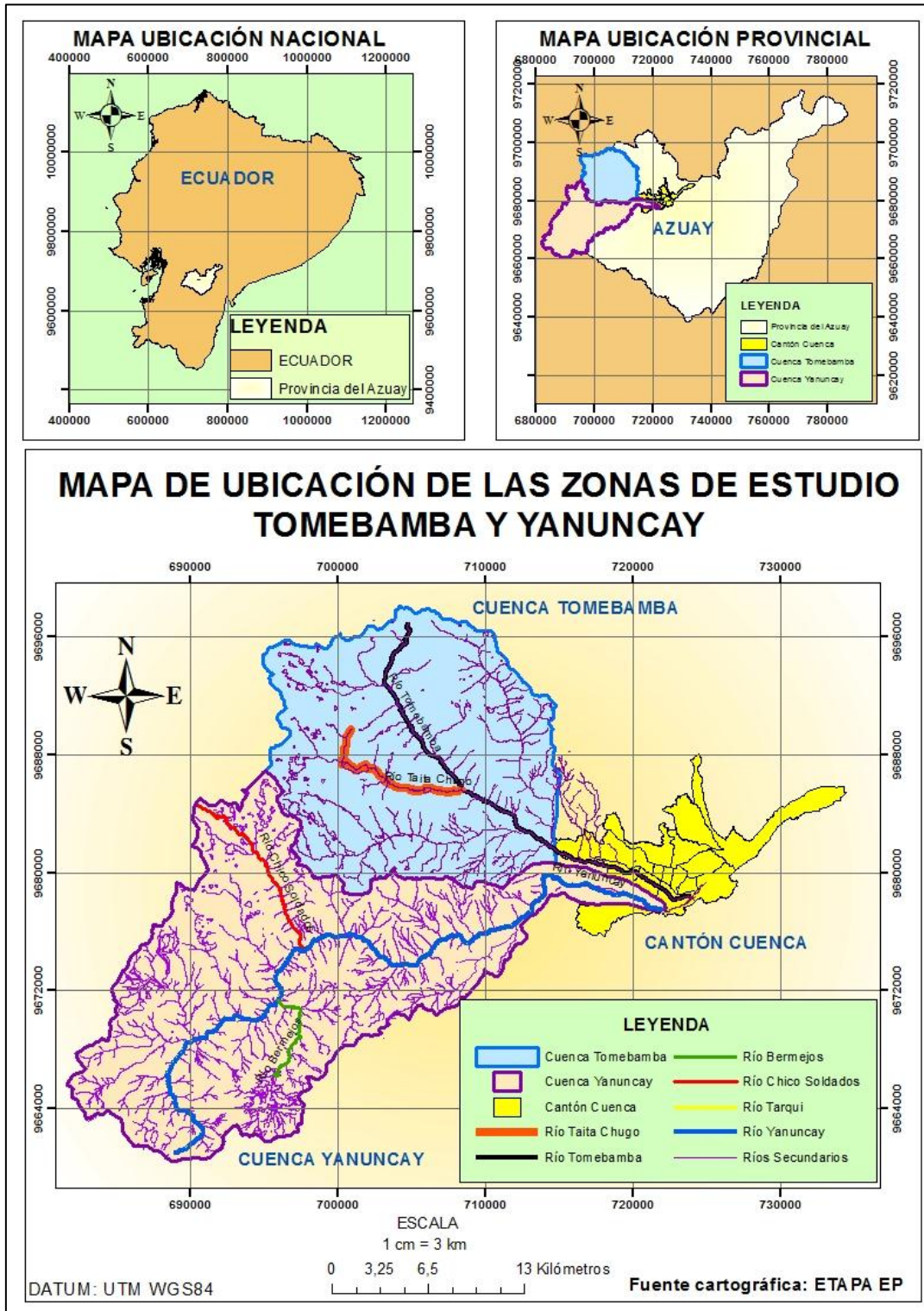


Figura 1. Ubicación de las zonas de estudio Tomebamba y Yanuncay. Modificación Cartográfica: Autores



A continuación se presenta en la tabla 1 las características físicas de cada cuenca. Este análisis fue posible gracias a la revisión de la literatura bibliográfica y al uso de varios software como ArcGis 10.4, RK Ward, hojas de cálculo de Excel.

Tabla 1. Características de las cuencas de estudio. Ríos Tomebamba y Yanuncay.

| Características | Zona de estudio | Zona de estudio |
|--------------------------------------|---|--|
| | Tomebamba | Yanuncay |
| Área de la cuenca (km ²) | 300,12 | 416,27 |
| Cobertura | Bosque nativo, eucaliptos, páramo, pasto, bosque de polylepis, cultivos. Al salir del Parque Nacional El Cajas, el río recorre zonas ganaderas, asentamientos humanos dispersos y áreas destinadas al turismo o a la actividad piscícola. | El bosque nativo ha desaparecido de la mayor parte de la cuenca, laderas cubiertas de pastos. Superficies cubiertas de chaparros, frecuentemente quemados para incrementar las zonas de pasto para el ganado. Poblados dispersos en la parte alta y media de la cuenca con incipiente actividad turística y piscícola. |
| Tipo de Suelo predominante | Andosol | Andosol |
| Uso de Suelo | Cultivos Zona ganadera | Cultivos Zonas ganaderas Asentamientos humanos dispersos |
| Pendiente promedio de la cuenca (%) | 22,16 | 15,30 |
| Estado | Forestada | Forestada |



| Forma de la Cuenca | Ovalada redonda irregular | Ovalada alargada irregular |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Perímetro (km) | 220,95 | 135,91 |
| Cota máxima m s.n.m. | 3955 | 3748 |
| Estación cota alta | Toreadora | Izhcayrrumi |
| Cota Mínima m s.n.m. | 2693 | 2520 |
| Estación cota baja | Matadero en Sayausí | Yanuncay A.J Tarqui |
| Desnivel máximo (m) | 1262 | 1228 |

2.2 Datos

2.2.1 Origen de los datos

Los datos fueron facilitados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y por ETAPA EP. A continuación describimos (Tabla 2) en detalle la proporción de los datos de las estaciones meteorológicas, pluviométricas y limnimétricas de las dos entidades mencionadas anteriormente.



Tabla 2. Detalle obtención de datos desde la Universidad de Cuenca y ETAPA EP.

| Zona de estudio | CÓDIGO | Universidad de Cuenca | ETAPA EP | Fecha instaladas (Nueva/Antigua) |
|-----------------|--------|-----------------------|----------|----------------------------------|
| Tomebamba | MAS | | X | Septiembre 2014 |
| | TOR | X | | Diciembre 2012 |
| | PAT | | X | Septiembre 2014 |
| | MAC | | X | Septiembre 2014 |
| | VEC | X | | Diciembre 2012 |
| | PIC | X | | Diciembre 2012 |
| | SAP | | | X |
| Yanuncay | YAP | | X | Septiembre 2014 |
| | YAJT | | X | Septiembre 2014 |
| | VEN | | X | Septiembre 2014 |
| | IZH | | X | Septiembre 2014 |
| | SOP | | X | Septiembre 2014 |
| | HUI | | | X |

Zona de estudio Tomebamba: MAS, Matadero Sayausí; TOR, Toreadora; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; PIC, Piscícola Chirimachay; SAP, Sayausí PTAP. **Zona de estudio Yanuncay:** YAP, Yanuncay en Pucán.; YAJT, Yanuncay A.J. Tarqui; VEN, Ventanas; IZH, Izhcayrrumi; SOP, Soldados PTAR; HUI, Huizhil.

2.2.2. Recopilación y estructura de datos

Se utilizaron las series del año hidrológico ene – dic 2015. Para la cuenca del río Tomebamba se usaron los datos pluviométricos de las estaciones Patoquinoas, Virgen de El Cajas, Piscícola Chirimachay, Sayausí en la PTAP y las estaciones meteorológicas de Toreadora, Matadero en Sayausí y Mamamag Camping. La estación de Matadero Sayausí también registra datos de niveles de agua y es aquí donde se realizó el cierre de la cuenca.

Para la cuenca del río Yanuncay se usaron las series de datos correspondientes a las estaciones pluviométricas de Huizhil y Yanuncay en Pucán, y las estaciones meteorológicas de Ventanas, Izhicayrrumi, Soldados



en la PTAR. El cierre de la cuenca se realizó en la estación hidrológica de Yanuncay AJ Tarqui.

Todos los datos de precipitación utilizados en este estudio pasaron por un estricto control de calidad de datos (Céleri et al., 2013), basados en el “Protocolo de control de calidad de datos hidrometeorológicos de la red de ETAPA EP (Guallpa, 2014b), y en la publicación realizada por la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos – iMHEA, en la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM-N° 168, 2010), en la publicación de la Guía de Prácticas Hidrológicas (OMM-N° 168, 2011), y en la publicación de Calibración e Instalación de Pluviómetro – Proyecto de Adaptación al Cambio Climático en Acueductos Rurales Colombianos (Roa, 2011).

Los datos meteorológicos proporcionados por la Universidad de Cuenca (TOR, VEC, PIC) ya fueron previamente analizados, los cuales fueron datos diarios. Los datos meteorológicos, pluviométricos y limnimétricos proporcionados por ETAPA EP (MAS, PAT, MAC, SAP, YAP, YAJT, VEN, IZH, SOP, HUI) eran datos crudos con información automática cada 5 minutos, los cuales fueron sometidos a diferentes procesos como un chequeo visual, identificación de datos erróneos, datos faltantes, análisis de picos, correlaciones entre estaciones, curvas de doble masa, gráficas de dispersión y posteriormente al relleno de datos por varios métodos (Luna & Lavado, 2015), tomando en cuenta que son series de datos cortas de alrededor de un año. Hemos obtenido también datos diarios, ya que de esta manera existían menos datos faltantes a comparación si los hubiésemos tomado cada 5 minutos. Para determinar el índice hidrológico Tiempo de Respuesta (LAG) se tomaron datos registrados a cada 5 minutos de estaciones pluviométricas y limnimétricas en los días 21/04/2015 para el río Yanuncay (día que presentó desbordamiento) y el 26/04/2015 para el río Tomebamba, durante el año 2015 no hubo desbordamiento de este río, pero se consideró este día porque existió mayor lluvia y se registró un caudal de $95 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo el mayor del año.



2.2.3 Mediciones de los datos

Los pluviógrafos utilizados son de cubeta basculante, con una resolución de impulso de 0,2 mm, estos pluviógrafos tienen dos cubetas. La lluvia llena una cubeta, y se produce un desbalance que dirige el flujo hacia la segunda cubeta (Gualpa, 2014c). El movimiento basculante se transmite hacia el aparato de registro automático (datalogger) y mide la distribución e intensidad de la precipitación (Roa, 2011).

Los caudales se miden mediante sensores ultrasónicos y también con sensores transductores de presión. Mediante aforos de caudales se construye una curva de gasto nivel – caudal, con la cual se transforma los niveles de agua registrado por los sensores a caudales (Gualpa, 2014a).

También se han instalado estaciones meteorológicas para medir la velocidad y dirección del viento (anemómetro), radiación solar (piranómetro), y sensores para determinar temperatura, humedad relativa, presión barométrica, temperatura de rocío, que son necesarias para el cálculo de la evapotranspiración para nuestro estudio (Gualpa, 2014b). La información de las estaciones utilizadas en este estudio lo va a encontrar de manera detallada en la tabla 3.



Tabla 3. Identificación de las estaciones empleadas en el estudio.

| Modelo / Marca | Código | UTMX | UTMY | Altura (m s.n.m.) | TIPO |
|----------------|--------|--------|---------|----------------------|---------------|
| Ser, Tex | MAS | 714618 | 9681633 | 2693 | Pluvio+Limn |
| Ser, Tex | TOR | 697618 | 9692227 | 3955 | Meteorológica |
| Ser, Tex, Dav | PAT | 699536 | 9692436 | 3795 | Pluviométrica |
| Ser, Tex, Dav | MAC | 699520 | 9687482 | 3592 | Meteorológica |
| Tex, Dav | VEC | 701110 | 9692382 | 3626 | Meteorológica |
| Ser, Tex | PIC | 705703 | 9688895 | 3298 | Pluviométrica |
| Ser, Tex | SAP | 714719 | 9683783 | 2847 | Pluviométrica |
| Ser | YAP | 703349 | 9674079 | 3000 | Pluvio+Limn |
| Tex, Dav | YAJT | 721828 | 9677485 | 2520 | Limnimétrica |
| Tex | VEN | 692346 | 9681395 | 3592 | Meteorológica |
| Tex | IZH | 693422 | 9677234 | 3748 | Meteorológica |
| Ser, Tex | SOP | 696891 | 9674608 | 3269 | Meteorológica |
| You | HUI | 714747 | 9678318 | 2773 | Pluviométrica |

Modelo estación: Ser, Serpe; Tex, Texas; Dav, Davis; You, Young. **Zona de estudio Tomebamba:** MAS, Matadero Sayausí; TOR, Toreadora; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; PIC, Piscícola Chirimachay; SAP, Sayausí PTAP. **Zona de estudio Yanuncay:** YAP, Yanuncay en Pucán.; YAJT, Yanuncay A.J. Tarqui; VEN, Ventanas; IZH, Izhcayrumi; SOP, Soldados PTAR; HUI, Huizhil.

A continuación se presenta la figura 2 de ubicación de las estaciones utilizadas en este análisis.

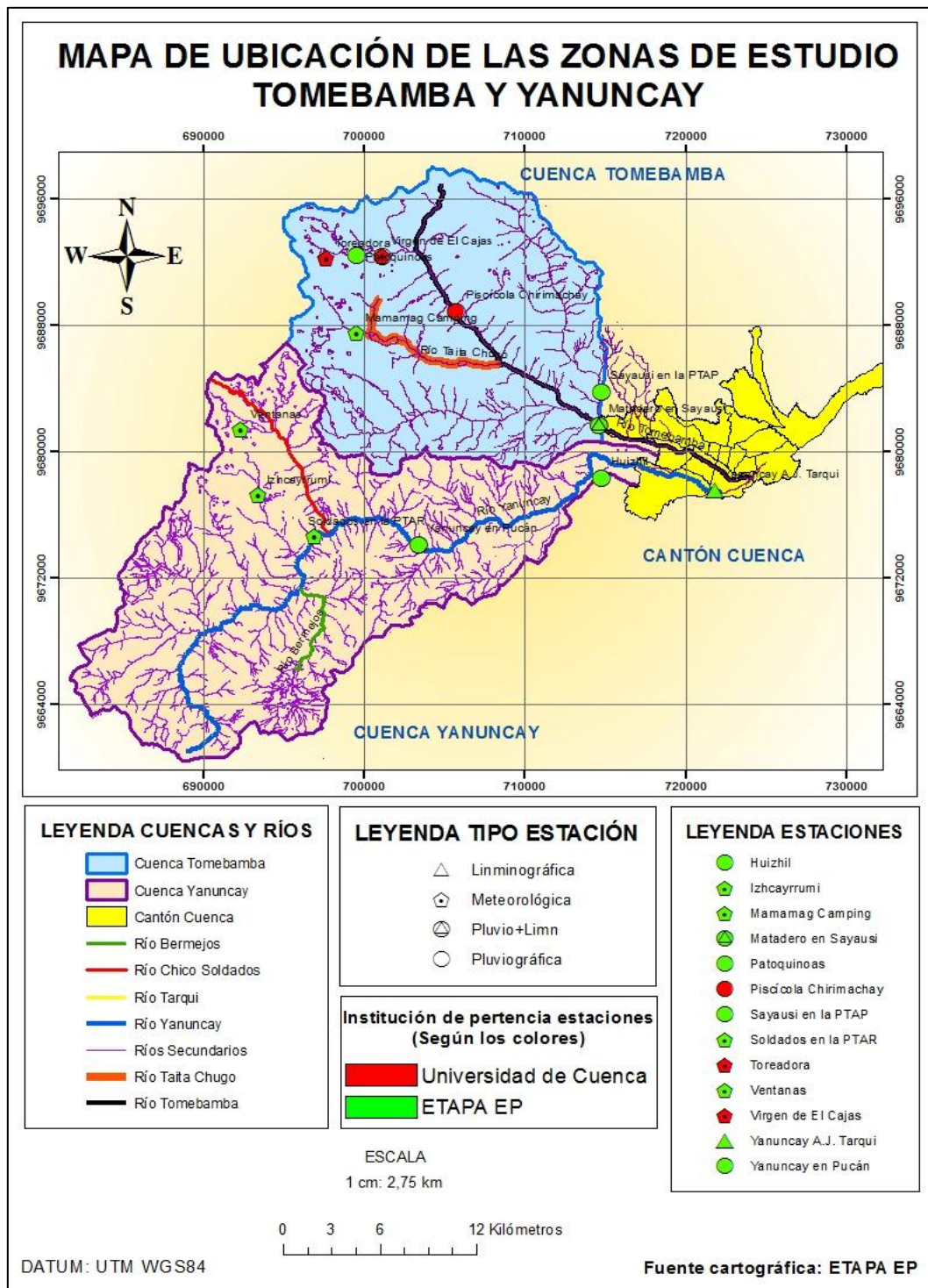


Figura 2. Ubicación estaciones hidrometeorológicas de las zonas de estudio.
Modificación Cartográfica: Autores



Al realizar el análisis visual de los datos faltantes durante todo el año 2015 en las dos cuencas, como se puede observar en la tabla 4 y 5, para Tomebamba se determinó el 5,67% de vacíos de datos diarios en todas las estaciones (Patoquinoas, Piscícola Chirimachay y Matadero Sayausí).

Por otro lado en la cuenca Yanuncay, como se puede observar en la tabla 4 y 6 se determinó el 4,47% de vacíos de datos diarios de todas las estaciones (Ventanas y Huizhil).

Tabla 4. Detalle de vacíos de lluvia en las estaciones pluviométricas de las zonas de estudio de Tomebamba y Yanuncay

| Código | Fecha inicio | Fecha final | Observaciones |
|--------|---------------------|---------------------|------------------------|
| PAT | 05/09/2015 11:35:00 | 06/11/2015 10:20:00 | Vacío datos de 65 días |
| PIC | 29/06/2015 0:00:01 | 23/08/2015 0:00:01 | Vacío datos de 64 días |
| | 21/09/2015 0:00:01 | 30/09/2015 0:00:01 | Vacío datos de 9 días |
| MAS | 06/01/2015 18:55:00 | 10/01/2015 11:00:00 | Vacío datos de 4 días |
| | 10/05/2015 0:00:00 | 13/05/2015 3:45:00 | Vacío datos de 3 días |
| VEN | 01/03/2015 5:40:00 | 28/05/2015 9:20:00 | Vacío datos de 88 días |
| HUI | 25/11/2015 12:35 | 05/12/2015 14:00 | Vacío datos de 10 días |

Zona de estudio Tomebamba: PAT, Patoquinoas; PIC, Piscícola Chirimachay; MAS, Matadero Sayausí. **Zona de estudio Yanuncay:** VEN, Ventanas; HUI, Huizhil.

En las siguientes tablas, los cuadros que están señalados (tablas 5 y 6) representan la falta de datos lluvia durante el año 2015.

Tabla 5. Series de tiempo de lluvia de la cuenca Tomebamba

| CUENCA TOMBAMBA | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
| ESTACIÓN | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| MAS | | | | | | | | | | | | | 0,27 % |
| TOR | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| PAT | | | | | | | | | | | | | 2,54% |
| MAC | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| VEC | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| PIC | | | | | | | | | | | | | 2,86% |
| SAP | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 5,67% |

Zona de estudio Tomebamba: MAS, Matadero Sayausí; TOR, Toreadora; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; PIC, Piscícola Chirimachay; SAP, Sayausí PTAP.

Tabla 6. Series de tiempo de lluvia de la cuenca Yanuncay

| CUENCA YANUNCAY | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-------|
| ESTACIÓN | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| IZH | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| SOP | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| VEN | | | | | | | | | | | | | 4,01% |
| HUI | | | | | | | | | | | | | 0,46% |
| YAP | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 4,47% |

Zona de estudio Yanuncay: IZH, Izhcayrumi; SOP, Soldados PTAR; VEN, Ventanas; HUI, Huizhil; YAP, Yanuncay en Pucán.

En las siguientes tablas 7 y 8, los cuadros que están señalados representan la falta de datos limnimétricos durante el año 2015.

Tabla 7. Series de tiempo limnimétricas de la cuenca Tomebamba

| CUENCA TOMBAMBA | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
| CÓDIGO | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| MATS | | | | | | | | | | | | | | 0,60 % |
| TMQB | | | | | | | | | | | | | | 0,18 % |
| TMDJ | | | | | | | | | | | | | | 4,60 % |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 5,41 % | |

Zona de estudio Tomebamba: MATS, Matadero Sayausí Caudal; TMQB, Tomebamba Quinta Balzay; TMDJ, Tomebamba D.J. Mazán.

Tabla 8. Series de tiempo limnimétricas de la cuenca Yanuncay

| CUENCA YANUNCAY | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-------|
| CÓDIGO | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| YAJT | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 0,00% | |

Zona de estudio Yanuncay: YAJT, Yanuncay A.J. Tarqui.

En las siguientes tablas, los cuadros que están señalados (tablas 9 y 10) representan la falta de datos meteorológicos durante el año 2015.

Tabla 9. Series de tiempo meteorológicos de la cuenca Tomebamba

| CUENCA TOMBAMBA | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-------|
| CÓDIGO | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| MAS | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| TOR | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MAC | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| VEC | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 0,00% | |

Zona de estudio Tomebamba: MAS, Matadero Sayausí; TOR, Toreadora; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas.

Tabla 10. Series de tiempo meteorológicos de la cuenca Yanuncay

| CUENCA YANUNCAY | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|-------|
| CÓDIGO | AÑO 2015 | | | | | | | | | | | | %vacíos | |
| IZH | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| SOP | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| VEN | | | | | | | | | | | | | | 0,00% |
| MES | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | 0,00% | |

Zona de estudio Yanuncay: IZH, Izhcayrrumi; SOP, Soldados PTAR; VEN, Ventanas.

3. MÉTODOS

Se asumió que la diferencia entre precipitación y el caudal de salida es similar a la cantidad de evapotranspiración, es decir, que la percolación profunda es despreciable. Así se ejecutó un análisis comparativo entre las cuencas Tomebamba y Yanuncay determinando los diferentes usos del suelo en porcentajes y de la cobertura vegetal. Se determinó el balance hídrico para comprender los impactos en las cuencas de estudio causados por cambio en uso de la tierra sobre la respuesta hidrológica.

3.1 Procesamiento de información

Se realizaron correlaciones entre las series pluviométricas diarias de cada estación, estableciendo semejanzas entre dos estaciones de par en par en nuestras dos cuencas de estudio. Las correlaciones buenas obtenidas entre series pluviométricas son utilizadas en algunos métodos de relleno de datos faltantes y también son empleadas en análisis de variabilidad de la lluvia para establecer comportamientos de base a la altura y distancia entre las estaciones pluviométricas.

La correlación de Pearson es un parámetro estadístico, conocido como R, el cual mide el grado de covariancia entre distintas variables relacionadas linealmente en un rango entre -1,0 y +1,0. Se considera significativa las correlaciones con valor superior a 0,7 (Oñate, 2009).

3.1.1 Control de calidad de datos.

Para las estaciones pluviométricas del río Tomebamba se tomaron las series de las estaciones de Toreadora – Virgen el Cajas (0,92); Toreadora – Mamamag Camping (0,89); Toreadora – Piscícola Chirimachay (0,81); Mamamag Camping – Virgen el Cajas (0,89); Mamamag Camping – Piscícola Chirimachay (0,84); Virgen el Cajas – Piscícola Chirimachay (0,78); los cuales presentaron correlaciones aceptables mayores a 0,78. Esto puede deberse a la cercanía entre estas estaciones, con regímenes de precipitaciones similares según el estudio de “Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio una gradiente altitudinal” que analiza los regímenes de precipitación en las estaciones pluviométricas de la zona de Tomebamba (Tapia, 2016). Posteriormente mediante la obtención del índice de estacionalidad verificaremos la semejanza en los regímenes de precipitación. Las estaciones más distantes son: Toreadora con Matadero Sayausí a una distancia de 20,03 km, las cuales presentan regímenes de precipitación diferentes (Tapia, 2016). Los coeficientes de correlación para la cuenca de Tomebamba puede apreciarse en la tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson en las estaciones pluviométricas – cuenca Tomebamba.

| | TOR | VEC | PAT | MAC | MAS | SAP | PIC |
|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| TOR | 1 | | | | | | |
| VEC | 0,92 | 1 | | | | | |
| PAT | 0,11 | 0,12 | 1 | | | | |
| MAC | 0,89 | 0,85 | 0,13 | 1 | | | |
| MAS | 0,47 | 0,46 | 0,15 | 0,49 | 1 | | |
| SAP | 0,20 | 0,16 | 0,11 | 0,16 | 0,14 | 1 | |
| PIC | 0,81 | 0,78 | 0,16 | 0,84 | 0,62 | 0,17 | 1 |

Zona de estudio Tomebamba: TOR, Toreadora; VEC, Virgen El Cajas; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; MAS, Matadero Sayausí; SAP, Sayausí PTAP; PIC, Piscícola Chirimachay.



Se observó que la estación de Matadero Sayausí tiene correlaciones menores a 0,49 con respecto al resto de estaciones, debido a que existe mayor distancia con respecto a esta. Además esta estación tiene una cota de 2693 m s.n.m.; mientras que el resto de estaciones están situadas en un rango de 2847 a 3955 m s.n.m.

Al analizar la base de datos crudos de las estaciones pertenecientes a ETAPA EP, no se presentaron datos atípicos, pero si la presencia de datos faltantes. En ocasiones debido a fallas de los equipos (datalogger) en las descargas y reseteo de los equipos.

Para rellenar la estación limnimétrica MATS, se procedió con la elaboración de matriz de correlación de Pearson entre las series de datos de descarga de caudales Tomebamba DJ Mazan L y Tomebamba Quinta Balzay.

A continuación se detalla en la tabla 12 los coeficientes de correlación de Pearson entre las estaciones limnimétricas para el río Tomebamba.

Tabla 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre las estaciones limnimétricas – cuenca Tomebamba.

| | MATS | TMQB | TMDJ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MATS | 1 | | |
| TMQB | 0,92 | 1 | |
| TMDJ | 0,74 | 0,50 | 1 |

Zona de estudio Tomebamba: MATS, Matadero Sayausí Caudal; TMQB, Tomebamba Quinta Balzay; TMDJ, Tomebamba D.J. Mazán.

Al observar la tabla 12, mediante el método de correlación de Pearson, de las 3 estaciones limnimétricas se determina que hay mayor correlación entre Matadero Sayausí y Tomebamba Quinta Balzay con 0,92.

En la zona de Yanuncay se determinó que las series de las estaciones pluviométricas de Izhicayrrumi, Soldados en PTAR, Ventanas y Yanuncay en Pucán presentaron una correlación aceptable entre ellas mayor a 0,75. Esto



puede deberse a que se encuentran relativamente cercanas entre estaciones, siendo las estaciones más distantes Huizhil con Ventanas con una distancia de 22,65 km tal como se puede apreciar en la tabla 13.

Tabla 13. Coeficientes de correlación estaciones pluviométricas – cuenca Yanuncay.

| | IZH | SOP | VEN | HUI | YAP |
|-----|------|------|------|------|-----|
| IZH | 1 | | | | |
| SOP | 0,80 | 1 | | | |
| VEN | 0,90 | 0,76 | 1 | | |
| HUI | 0,49 | 0,51 | 0,53 | 1 | |
| YAP | 0,66 | 0,75 | 0,63 | 0,47 | 1 |

Zona de estudio de Yanuncay: IZH, Izhcayrrumi; SOP, Soldados PTAR; VEN, Ventanas; HUI, Huizhil; YAP, Yanuncay en Pucán.

Se puede observar que la estación de Huizhil se tuvo correlaciones menores a 0,53 con respecto al resto de estaciones, lo que puede deberse a que existe mayor distancia con respecto a esta; y se debe considerar que también esta estación se encuentra a 2773 m s.n.m., mientras que el resto de estaciones están situadas en un rango de 3000 a 3748 m s.n.m.

El protocolo editado por ETAPA EP, cuyo autor es el Ingeniero Mario Guallpa (Guallpa, 2014b), está orientado al control de calidad de datos de lluvia registrado por los pluviógrafos de balancín, datos de alturas de agua registrado por los sensores de nivel y datos de variables climáticas registradas por las estaciones meteorológicas.

La información de Tomebamba y Yanuncay fue procesada mediante un Script-Agregación-Promedio, elaborado por el especialista en hidrología de ecosistemas andinos Boris Ochoa, que nos permitió obtener datos diarios de precipitación y caudal (Ochoa, 2014).



3.1.2. Resumen de los Métodos

3.1.2.1. Análisis visual – Determinación de datos faltantes

Se visualizaron las series de datos de todas las estaciones pluviométricas, meteorológicas y limnimétricas, determinando datos faltantes en las series (Rodrigo & Fernández, 2014), por este proceso pasaron todos los datos de las estaciones de las dos zonas de estudio. En caso de encontrar valores atípicos se eliminan si es que se considera necesario. Al finalizar los organizamos en una tabla de cálculo de Excel script-Agregación-Promedio (Gualpa, 2014a), para obtener datos diarios para los períodos de tiempo existentes de cada una. Posteriormente se obtuvo los porcentajes de datos faltantes de cada serie de datos de cada estación analizada (Ochoa, 2013).

3.1.2.2. Chequeo de picos

Se ubicaron los valores más altos (picos) en las series pluviométricas y limnimétricas. Los datos fueron observados en base a los valores de precipitación que se presentaron en las series de estaciones cercanas en el mismo día o días continuos, determinando así, que los valores eran incongruentes o no. Para cuando los valores eran altos nos basamos en intercuartiles, donde los valores mayores a este son sustituidos de manera que se reduce el sesgo por ser un valor extremo pero a la vez mantenemos información de eventos extremos (Rodrigo & Fernández, 2014).

3.1.2.3. Análisis de Correlaciones

Se aplicaron relaciones entre las series de estaciones pluviométricas y limnimétricas para establecer el grado de afinidad o semejanzas entre dos estaciones. Para ello se realizó una matriz de correlación de Pearson (Ver tablas 11, 12, y 13), tablas de distancias entre estaciones (Ver tabla 14), e identificación de regímenes de precipitación (Céleri, 2007).

3.1.2.4. Análisis de Homogeneidad a través de las curvas de doble masa

Se empleó este método para observar la existencia de valores atípicos en las series pluviométricas que no se las pudieron encontrar en el análisis visual (Rodrigo & Fernández, 2014). Para realizar este método se requiere establecer por lo menos una serie como homogénea (Mamamag Camping, Toreadora,



Virgen El Cajas, Piscícola Chirimachay), con valores promediados, excepto de la estación que se deseaba analizar. Luego se ordenan estos datos por fecha (datos recientes a los más antiguos) para elaborar acumulaciones, en la serie homogénea (serie base) y en la serie que se requería del relleno (serie incompleta). Posteriormente se grafican las series acumuladas considerando que la serie homogénea base se ubica en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas va la serie incompleta. Así en el gráfico se determina los puntos sucesivos, los cuales sirven como guía de una única línea recta, estableciendo la homogeneidad en el registro, en el caso de que no existía una línea recta o presentaba discontinuidades en la sucesión de puntos era un indicador de que el registro no es homogéneo (Bercián & Palomo, 2004).

3.1.2.5. Tendencias similares entre series mediante las gráficas de dispersión

Para determinar si existe o no una distribución similar de los datos se elaboró gráficas de dispersión empleando los datos de las diferentes series pluviométricas. Se pudo establecer relleno de datos mediante la ecuación generada por la línea de tendencia entre las dos series analizadas. En las gráficas cuyas coeficientes de correlaciones aceptables ($R^2 > 0,7$); se empleó una serie base en el eje de las abscisas y una serie incompleta en el eje de las coordenadas en el mismo lapso de tiempo, de manera que se pueda visualizar si la nube de tendencias son semejantes, cuyos valores de la serie incompleta se encuentran en el mismo rango de varianza de los errores con respecto a la línea de tendencia (Bercián & Palomo, 2004).

3.1.2.6. Media aritmética

Es un cálculo estadístico para la obtención de valores de precipitación en registros de series con datos faltantes, por lo que se emplea datos de series de estaciones cercanas a la estación incompleta (OMM-N° 168, 2010).

Se suma el valor registrado en cada una de las estaciones pluviométricas, las cuales están dentro de la cuenca analizada y dividirla por el número total de estaciones, siendo el valor así hallado la precipitación media (Chow, 1998).



Este método presenta la siguiente fórmula.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

Ecuación [1]

Donde;

\bar{P} = precipitación media sobre la cuenca, (mm)

P_i = precipitación observada en la Estación i , (mm)

n = número de estaciones

3.1.2.7. Regresión Lineal

Consiste en seleccionar una serie de datos con un comportamiento similar, en el cual la serie de datos de referencia debe estar completa por lo menos en los períodos para los cuales faltan datos en la otra serie. Los valores de la serie de referencia se denotan como x_i y los de la serie a completar se denotan como y_i (Rodrigo & Fernández, 2014).

$$y = a + bx$$

Ecuación [2]

Donde; y es la precipitación estimada, x es la precipitación de las constantes de la regresión lineal.

A través del coeficiente de correlación ($R^2 > 0,7$); y con regímenes de precipitación semejantes, se determina la mejor estación para correlacionar (Luna & Lavado, 2015).

Para rellenar la estación de Patoquinoas Se aplicó los métodos de Razones de Distancias (MRD), Razón–Normal (MRN) Promedios Vecinales (MPV) y Razones promedio (MRP).

3.1.2.8. Método de Razones de Distancia

Utilizado para estimar datos de un año, donde las estaciones deber tener una disposición espacial lineal como se muestra en la figura 3. Donde las

estaciones A y B tienen información completa. Y en la estación X está incompleta, es decir la que se va a rellenar, aplicando la ecuación 3 (Luna & Lavado, 2015).

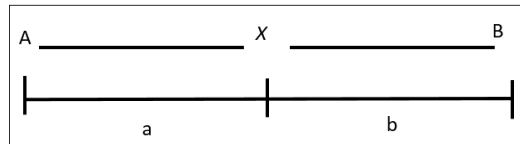


Figura 3. Disposición espacial para la completar por razones de distancia.
Fuente: (Pizarro, 1993)

Consiste en relacionar las estaciones con las distancias entre ellas mediante la siguiente ecuación 3:

Donde;

$$PX = PA + a * \frac{(PB - PA)}{(a + b)} \quad \text{Ecuación [3]}$$

PX = Precipitación de la estación (Patoquinoas) que realizaremos el relleno

PA = Precipitación de la estación con datos completos (Toreadora).

PB = Precipitación de la estación con datos completos (Virgen el Cajas).

a = distancia de Patoquinoas a Toreadora

b = distancia de Patoquinoas a Virgen el Cajas

Con este método se logró rellenar 2 meses de datos de la estación Patoquinoas obteniendo la precipitación promedio anual.

3.1.2.9. Método de la Razón - Normal

Este método considera promedios de precipitación anuales en períodos iguales, no normales. Se aplica con tres estaciones cercanas y uniformemente espaciadas con respecto a la estación en estudio (Montoya, 2014). Este considera promedios de precipitación anuales en períodos iguales, no normales, esto es con el fin de obtener la precipitación anual de Patoquinoas. Sea P_x la precipitación anual de una estación X para un año determinado y



utilizando los datos de dos estaciones A y B conocidas, se aplica la siguiente ecuación 4.

$$P_x = 0,5 * \left(N_x \frac{P_A}{N_A} + N_x \frac{P_B}{N_B} \right)$$

Ecuación [4]

Donde; N_x : precipitación promedio de la estación X , para el mismo período que se obtiene la lluvia promedio de la estación A (N_A) y B (N_B). P_A y P_B : valores correspondientes a P_x , de las estaciones A y B .

3.1.2.10. Método de Razones Promedios

Este método consiste en observar las estaciones más cercanas con series de datos completos (Luna & Lavado, 2015), nuevamente para este análisis tomamos información de las estaciones Toreadora, Virgen el Cajas, Piscícola Chirimachay, y procedemos a elaborar el promedio diario anual de estas estaciones, obteniendo un único dato diario anual, también calculamos un dato promedio diario anual de precipitación para Patoquinoas. Aplicamos entonces la siguiente ecuación 5.

$$P_X = \frac{P_x}{N} * \left(\frac{P_A}{P_a} + \frac{P_B}{P_b} + \frac{P_C}{P_c} + \dots + \frac{P_N}{P_n} \right)$$

Ecuación [5]

Donde;

P_x = Precipitación Promedio Patoquinoas (mm)

P_X = Precipitación Diaria Patoquinoas (mm)

P_a = Precipitación Promedio Toreadora (mm)

P_A = Precipitación Diaria Toreadora (mm)

P_b = Precipitación Promedio Virgen El Cajas (mm)

P_B = Precipitación Diaria Virgen El Cajas (mm)

P_c = Precipitación Promedio Piscícola Chirimachay (mm)

PC = Precipitación Diaria Piscícola Chirimachay (mm)

PN = Precipitación Promedio De Las Estaciones Existentes (mm)

N = Número De Estaciones Vecinas

3.1.2.11. Método de Promedios Vecinales

Este método consiste en observar las estaciones más cercanas con series de datos completos de por lo menos un año. Se debe considerar la distribución espacial en donde la estación con carencia de datos, esté ubicada en el centro de tres estaciones con estadística completa como se observa en la figura 4 (Luna & Lavado, 2015). Para este análisis se tomó información de tres estaciones con similitud en su régimen de precipitación. Las estaciones elegidas son: Toreadora, Virgen el Cajas y Piscícola Chirimachay, esta última estación (PC) no tiene la serie completa pero sin embargo tomamos el registro de la serie de tiempo donde teníamos llena y procedimos a elaborar el promedio diario aplicando la ecuación 6. Así, se obtuvo datos diarios para Patoquinoas.

$$PX = \sum_{i=1}^n \frac{Pi}{n}$$

Ecuación [6]

Donde; P_i es la precipitación de las estaciones A , B , C , y n es el número de estaciones.

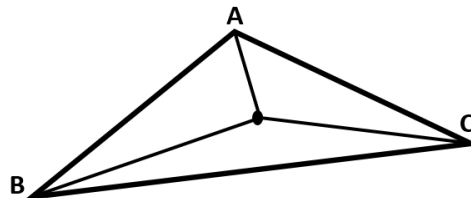


Figura 4. Disposición espacial para la completar de datos por promedios vecinales. Fuente: (Pizarro, 1993)



3.1.3. Descripción de las estaciones rellenadas

Para los datos en las estaciones meteorológicas en el caso de Toreadora, Virgen El Cajas, y Mamamag Camping (datos de radiación solar neta, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento), fueron entregados por la Universidad de Cuenca (Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales), en registros diarios (durante el año 2015) completos depurados, por lo que al hacer el análisis visual y verificar en el control de calidad de datos, no se identificó ninguna anomalía, por lo tanto no se les aplicó ningún método de relleno en estos registros.

Los datos meteorológicos en el caso de Matadero Sayausí, fueron entregados por ETAPA EP, estos registros estaban en series de tiempo cada 5 minutos (durante el año 2015), fueron analizados en una hoja (Promedio), de cálculo Script – Agregación – Promedio, elaborada por el Ingeniero Boris Ochoa (Ochoa et al., 2012), para la obtención de datos diarios.

Al rellenar los datos en las estaciones pluviométricas (lluvia) en Patoquinoas, Piscícola Chirimachay, Matadero Sayausí, Ventanas y Huizhil se aplicaron diferentes métodos de rellenos. Bajo los parámetros establecidos en el coeficiente de correlación de Pearson, entre estaciones que tienen datos completos y con las que poseen un valor mayor de $R^2 > 0,7$.

Para rellenar estaciones con el método de regresión lineal se empleó información de las estaciones incompletas con ayuda de las estaciones completas. En el caso de Matadero Sayausí al ser una estación limnimétrica se correlacionó con la información de las estaciones de Tomebamba DJ Mazan L y Tomebamba Quinta Balzay.

Al realizar la primera relación, entre las estaciones Matadero Sayausí – Tomebamba DJ Mazan L. se obtuvo un valor bajo de R^2 ($R^2 = 0,51$ cuya ecuación es: $y=0,0349x-0,1174$). En la segunda relación Matadero Sayausí – Tomebamba Quinta Balzay, se presentó un valor bueno de R^2 ($R^2 = 0,86$ cuya ecuación es: $y = 1,0711x + 5,9326$), esta relación si cumple con los parámetros



de correlación (Rocco & Ojeda, 2011), por lo que se procedió al relleno de datos de los 7 días para la estación Matadero Sayausí. (3 días en el mes de enero y 4 días en el mes de mayo).

En el relleno de datos en la estación pluviométrica Piscícola Chirimachay utilizamos el método de la regresión lineal con la información de la estación de Mamamag Camping, ya que con estas estaciones tienen un régimen de precipitaciones parecidos por su ubicación y además poseen un coeficiente alto de correlación (0,84), la ventaja es también que cuentan con una serie completa de datos cada 5 minutos (ene – dic 2015). Se elaboró las gráficas en una hoja de cálculo de Excel para extraer el R^2 , con su ecuación de regresión lineal ($R^2=0,77$ cuya ecuación $y = 0,9153x + 0,3221$) para reemplazarla en la estación que nos falta datos, en este caso rellenamos 73 días de vacíos de datos.

La estación pluviométrica Patoquinoas presenta 2 meses de vacíos de datos, en los meses de septiembre e inicios noviembre. Se consideró el coeficiente de correlación de Pearson con respecto a las demás estaciones, determinando que posee valores de R^2 menores a 0,16. Indicando que no se puede correlacionar con ninguna estación. Para esta estación, se analizó la ubicación de Patoquinoas, determinando que se encuentra entre Toreadora y Virgen el Cajas, por lo que se rellenó mediante cuatro métodos comparativos como se describe en el punto 3.1.2 Métodos de relleno, en el que se pudo validar el mejor método para ajustarlo al relleno de la serie de datos en la estación Patoquinoas, utilizando datos diarios de estas estaciones cercanas. Para ello se elaboró una tabla 14 para identificar las distancias, entre las estaciones pluviométricas.



Tabla 14. Distancias entre las estaciones pluviométricas del río Tomebamba en unidades de km.

| Código | TOR | VEC | PAT | MAC | SAP | PIC | MAS |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| TOR | 0 | | | | | | |
| VEC | 3,50 | 0 | | | | | |
| PAT | 1,93 | 1,57 | 0 | | | | |
| MAC | 5,11 | 5,15 | 4,95 | 0 | | | |
| SAP | 19,7 | 16,09 | 17,47 | 15,64 | 0 | | |
| PIC | 8,74 | 5,77 | 7,11 | 6,34 | 10,36 | 0 | |
| MAS | 20,03 | 17,26 | 18,55 | 16,19 | 2,15 | 11,50 | 0 |

Zona de estudio Tomebamba: TOR, Toreadora; VEC, Virgen El Cajas; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; SAP, Sayausí PTAP; PIC, Piscícola Chirimachay; MAS, Matadero Sayausí.

Mediante el cálculo de las distancias (calculado en ArcGis 10.4) entre las estaciones pluviométricas (tabla 14) se observa que la mayor distancia es entre Matadero Sayausí y Toreadora a 20,03 Km, donde la estación Toreadora se encuentra a una cota de 3955 m s.n.m. y Matadero Sayausí a una cota de 2693 m s.n.m; y las estaciones menos distantes son entre Patoquinoas y Virgen El Cajas a 1,57 km.

3.1.4 Polígonos de Thiessen

Para poder determinar la precipitación anual ponderada lo realizamos aplicando el método de los polígonos de Thiessen, esto es con el fin de poder analizar también el efecto de la densidad de estaciones sobre el balance hídrico. Este método se basa principalmente en ponderar el valor de la variable climática en cada estación en función del área de influencia (M. Martínez, Fernández, & Salas, 2007), en nuestro caso de las cuencas de estudio. La ponderación proporciona resultados rápidos y aceptables, la cual se determina con la siguiente ecuación 7:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \cdot A_i)}{A} = \sum_{i=1}^n \left(P_i \cdot \frac{A_i}{A} \right)$$

Ecuación [7]

Donde;

\bar{P} = Precipitación media sobre la cuenca, (mm)

P_i = Precipitación observada en la Estación i, (mm)

A_i = Área del polígono correspondiente a la Estación i, (km²)

A = Área total de la cuenca, (km²)

n = Número de estaciones pluviométricas con influencia de la cuenca.

Se requiere el conocimiento de la ubicación de cada estación dentro de la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación. Así vamos obteniendo triángulos entre estaciones más cercanas, uniéndolas con segmentos rectos sin cortarse entre sí, logrando a su vez que sean lo más equiláteros posibles. A partir de allí se trazan líneas bisectoras perpendiculares, en cada uno de los lados de los triángulos, las que se unen en un punto común dentro de cada triángulo, estos conforman una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación (Morán, 2003).

3.1.5 Pendiente media

Para la obtención de la pendiente promedio de cada cuenca se usó el software ArcGis 10.4, con el cual se obtuvo las pendientes en toda la cuenca hidrográfica de cada una de nuestras zonas de estudio, finalmente mediante una hoja de cálculo electrónico en Excel se llevaron a cabo las operaciones matemáticas – estadísticas, obteniendo como resultado la pendiente promedio, el cual nos servirá para el análisis de uso de suelo y cobertura vegetal de las cuencas. Los valores del rango en el que clasifica la pendiente lo tomamos del estudio “Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión” (Edeso, Marauri, & Merino, 1995) y del estudio “Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y

movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el Municipio de Cocorná” (Zuluaga et al., 2011).

3.2 Balance Hídrico

El principio de conservación de masas, aplicado en el balance hídrico convierte la ecuación de continuidad en la ley fundamental de la hidrología, que se establece a un volumen arbitrario en un cierto período de tiempo. La variación en el volumen de agua almacenada es la diferencia entre las entradas y salidas. Esto determina mediciones de almacenamientos y flujos de agua, pero según el período de tiempo y el volumen, se pueden eliminar algunas mediciones para el cálculo del balance hídrico (Sivisaca & Lenin, 2011), En la ecuación se considera como entradas a la precipitación (P), como lluvia o nieve, a los caudales subterráneos o superficiales recibidos desde afuera (Q_{SI}) y (Q_{UI}). Las salidas en la ecuación se consideran a las corrientes de agua superficial o subterránea que salen de la cuenca (Q_{SO}) y (Q_{UO}), y a la evapotranspiración (E). Además se considera al volumen d

e agua que se almacena (Δs) cuando las entradas han superado a las salidas. A continuación establecemos un término residual o de diferencia (y) generado por los errores de medida o estimación de los componentes del balance hídrico (FAO 56, 1990). Así se establece la fórmula (ecuación 8) más general para el cálculo del balance hídrico enfocado a cualquier sistema de agua en un tiempo determinando.

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta s - y = 0$$

Ecuación [8]

Al definir las cuencas con una divisoria, se considera a las aportaciones superficiales como despreciables, por lo que la expresión (Q_{SI}) y (Q_{UI}) no se coloca en la ecuación del balance. Por ello la fórmula que queda se expresa en la siguiente ecuación 9:

$$P - E - Q - \Delta s - y = 0$$

Ecuación [9]



Las variables analizadas y el método empleado se lo resumen en la tabla 15.

Tabla 15. Variables y descripción empleadas en los cálculos.

| Variable | Método del cálculo |
|----------|---|
| P | Precipitación promedio en el período de estudio. |
| Etp | Método de Penman-Monteith, publicado por FAO. |
| Q | Descarga a la salida de la cuenca en el período de estudio. Q/A |

Descripción de las variables: P, Precipitación; Etp, Evapotranspiración potencial; Q, Descarga

Es así, entonces como la ecuación simplificada del balance hídrico queda expresada de la siguiente manera como se ve en la ecuación 10.

$$\text{Precipitación (P)} = \text{Caudal(Q)} + \text{Evapotranspiración (ETP)}$$

Ecuación [10]

3.2.1 Precipitación media

La precipitación media de la cuenca se obtiene sumando los productos de las precipitaciones de cada estación por el área del polígono correspondiente y dividiendo la suma entre el área total de la misma cuenca.

Para determinar la precipitación de las zonas de estudio se utilizó los polígonos de Thiessen con la ayuda de ArcGis 10.4. Este método toma en cuenta la no-uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos (UNESCO, 2006). Como conocimiento previo, se necesita conocer la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, identificando el área de influencia de cada pluviógrafo (Guallpa, 2015).

3.2.2 Evapotranspiración (E_{T0})

Para calcular la evapotranspiración E_{T0} , empleamos el Método Penman – Monteith (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). La Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura (FAO), modificó la fórmula, creando el Método Penman – Monteith FAO, considerado como único método



estándar con alta probabilidad de predecir correctamente la E_{TO} , a pesar de la gama de climas, ubicaciones, incorporando parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Este método plantea la selección de un cultivo hipotético de referencia con una altura del cultivo asumida de 0,12 metros, una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23. Por estos parámetros la E_{TO} es conocida como evapotranspiración de referencia por la FAO.

Para calcular la E_{TO} en nuestro estudio se lo hizo con elementos meteorológicos como la radiación solar neta [$\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$], temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$], velocidad del viento [m s^{-1}] y la humedad relativa [%], con una evaluación y precisión significativa de los datos para que la estimación de la evapotranspiración sea representativa, como se establece la siguiente ecuación 9 del cálculo de Penman-Monteith (FAO 56, 1990).

$$E_{REAL} = E_{TO} * K_C * K_S$$

Ecuación [11]

La E_{TO} es la evapotranspiración de referencia, K_C es el coeficiente de cultivo y K_S es un factor de escases de agua (estrés hídrico), que es igual a 1 en caso de que el estudio se ubique en zonas sin problemas de escases. El coeficiente de cultivo K_C , es la relación entre E_{REAL} y E_{TO} , esto representa una integración de los efectos de las cuatro características principales que distinguen el cultivo de referencia, las cuales son la altura del cultivo, el albedo de la superficie de cultivo del suelo, la resistencia de la superficie de la capa vegetal y la evaporación del suelo (FAO 56, 1990).

Sobre la resistencia se distingue entre una resistencia superficial (r_s), que es la que describe la resistencia al flujo de vapor a través de los estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo. La resistencia aerodinámica, (r_a), describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas (Allen



et al., 2006), El método combinado de Penman-Monteith FAO se muestra en la ecuación 12.

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Ecuación [12]

Donde: (R_n) es la radiación neta, (G) es el flujo de calor en el suelo, ($e_s - e_a$) representa el déficit de presión de vapor del aire, (ρ_a) es la densidad media del aire a presión constante, (c_p) es el calor específico del aire, (Δ) representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, (γ) es la constante psicrométrica y (r_s) y (r_a) son las resistencias superficial (total) y aerodinámica. Para comprender y conocer más de cada uno de los términos de la ecuación, se recomienda revisar el capítulo 3 del estudio “Estudio FAO Riego y Drenaje N°56-Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (Allen et al., 2006), menciona la FAO que este método calcula la E_{T0} diaria. A continuación se presenta en la tabla 16 las unidades en que se encuentran las variables antes mencionadas.

Tabla 16. Presentación de las unidades en que se encuentran las variables en la fórmula de la Evapotranspiración.

| Símbolo | Descripción | Unidades |
|-------------|---|--------------------------------------|
| ET_0 | evapotranspiración de referencia | mm día ⁻¹ |
| R_n | radiación neta superficial del cultivo | MJ m ⁻² día ⁻¹ |
| G | flujo de calor en el suelo | MJ m ⁻² día ⁻¹ |
| e_s | presión de vapor de saturación | kPA |
| e_a | presión real de vapor | kPA |
| $e_s - e_a$ | déficit de presión de vapor | kPA |
| ρ_a | densidad media del aire a presión constante | kg m ⁻³ |
| c_p | calor específico del aire | MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹ |
| Δ | pendiente de la curva de presión de vapor | kPA °C ⁻¹ |
| γ | constante psicométrica | kPA °C ⁻¹ |
| r_s | resistencia superficial (total) | s m ⁻¹ |
| r_a | resistencia aerodinámica | s m ⁻¹ |

Fuente: (FAO 56, 1990)

Con las temperaturas máximas y mínimas se calcula la presión de saturación de vapor, mientras que la presión real de vapor se puede derivar con la temperatura de punto de rocío o con las humedades relativas máximas y mínimas. Además la radiación solar diaria que es parte integral de este método se puede estimar en base a la variación de la temperatura (Allen et al., 2006).

3.2.3 Descarga

Para la obtención de la descarga se obtuvieron los caudales a nivel diario y anual que fluyen por cada cuenca (Tomebamba y Yanuncay), luego estos valores se los dividieron para el área correspondiente a cada una.

Los datos otorgados por ETAPA EP de los niveles de caudal eran crudos por lo que se realiza un previo control de datos en una hoja de cálculo electrónica, aplicando las ecuaciones de transformación de niveles a caudales, (Guallpa, 2013). Obteniéndose de esta manera la descarga en m³/s. Al tener los registros



de series de datos depurados aplicamos los métodos de relleno descritos en el numeral 3.1.2. Métodos de rellenos de datos.

3.3 Efecto de la densidad de estaciones sobre el cierre del balance hídrico

Para realizar este análisis se dejó fuera del estudio una estación a la vez, hasta quedarnos con una sola estación que va a corresponder a la estación histórica. Para la cuenca Tomebamba la estación histórica corresponde a la estación de Piscícola Chirimachay y para la cuenca Yanuncay la estación histórica corresponde a Yanuncay en Pucán.

La eliminación de las estaciones fueron realizadas de manera visual, eliminando estación por estación siempre tratando de dejar estaciones cubriendo los diferentes regímenes de precipitación y el mayor área de la cuenca analizada, esto puede variar significativamente los valores en la obtención de los polígonos de Thiessen, ya que por experiencia y visualización obtuvimos los valores definitivos como se puede apreciar en la tabla 24.

3.4 Indicadores hidrológicos

Conocer la disponibilidad y regulación del recurso agua de una cuenca en los diferentes meses del año es un aspecto valioso para un manejo sostenible en el tiempo (Célleri, Bièvre, & Iñiguez, 2004). Con los datos de caudal y lluvia registrados en el período enero – diciembre 2015 se conoció y comparó los diferentes indicadores hidrológicos, y mediante estos el comportamiento de las cuencas Tomebamba y Yanuncay.

A continuación se pueden encontrar a detalle los indicadores de disponibilidad y regulación empleados en el estudio, en la tabla 17, cuya fuente es la publicación Parámetros e Indicadores Hidrológicos para Ecosistemas Andinos – Iniciativa MHEA (Ochoa et al., 2012).

Tabla 17. Parámetros e indicadores hidrológicos de disponibilidad y regulación utilizados, para efectuar comparaciones entre las cuencas de estudio .

| Indicadores hidrológicos de disponibilidad | | | |
|---|--|--|--|
| Indicador | Representa | Indica | Método de obtención |
| Caudal o volumen medio anual o mensual | El promedio, a lo largo de todo un año, o incluso un mes, del caudal que sale de la cuenca. Valor promedio del volumen total de caudal que drena a diario o mensual. | El caudal o volumen de salida de la cuenca durante diferentes períodos. Indica de manera sencilla la oferta promedio diaria o mensual de agua. | Se sacó el valor promedio de los datos de caudal diario para el respectivo período y lo dividimos por el área de la cuenca. Para el cálculo de volumen, se multiplicó los valores de caudal específicos por el intervalo de tiempo de toma de datos. |
| Precipitación mensual, anual | La cantidad de agua total que ingresa en la cuenca, durante un período de 1 año. | Las pérdidas anuales del sistema. Es decir, la cantidad de lluvia que no sale de la cuenca como caudal y es por lo tanto considerada como pérdida del recurso que sale del sistema por otros medios, tal vez por evaporación, extracción, etc. | Pérdida anual = Precipitación - Caudal (ambos en las mismas unidades, mm), para el año 2015. |
| Diferencia entre precipitación y caudal anual. | La diferencia entre la cantidad de agua total que ingresa en la | Las pérdidas anuales del sistema. | Pérdida anual = Precipitación - Caudal (ambos en las mismas unidades, mm), para el año 2015. |



| | cuenca y la que sale de ella, durante un período de 1 año. | | |
|--|---|--|--|
| Índice de estacionalidad (SI) | La relación entre las desviaciones de precipitación acumuladas de cada mes frente a un valor esperado. | La estacionalidad del régimen de precipitación de una cuenca. | $SI = (1 / \text{precipitación anual}) * \text{Suma de valores absolutos (precipitación mensual - precipitación esperada)}$. La precipitación esperada es el valor de la precipitación si el reparto fuera homogéneo, es decir, la precipitación anual fue dividida para 12 meses. |
| Diferencia coeficiente de escorrentía. | Relación entre la cantidad de agua total que sale de la cuenca sobre la altura de precipitación que ingresó en ella, durante un período de tiempo dado. | La proporción de la precipitación que ingresa a la cuenca convertida en caudal que sale de la cuenca. Es decir, el rendimiento hidrológico total de la cuenca. | $RC = \text{Caudal} / \text{Precipitación}$ (ambos en las mismas unidades, mm), para el año 2015. |
| Indicadores Hidrológicos de Regulación | | | |
| Indicador | Representa | Indica | Método de obtención |
| Rango de descarga. | Proporción entre los caudales máximo y mínimo registrados durante un período de | La variabilidad global del sistema. | Proporción: Razón entre máximo caudal instantáneo registrado respecto al mínimo caudal instantáneo registrado. |



| | | | |
|---|--|---|--|
| | tiempo dado. | | |
| Percentil 5 de caudal (Q95). | La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 95% del tiempo. | El caudal bajo o caudal base. Q95 (el percentil 5 de caudal) es el caudal que es igualado o superado por el 95% del período seleccionado. | El valor de Q95 se toma del análisis para la curva de duración de caudal. |
| Percentil 90 de caudal (Q10). | La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 10% del tiempo. Representativo de los caudales altos en la respuesta hidrológica completa. | Q10 (el percentil 90 de caudal) es el caudal que es igualado o superado por el 10% del período seleccionado. Es representativo de los caudales altos. | El valor de Q10 se toma del análisis para la curva de duración de caudal. |
| Percentil 50 de caudal (Q50). | La magnitud de caudal que es igualada o excedida el 50% del tiempo. | Q50 (el percentil 50 de caudal) es el caudal que es igualado o superado por el 50% del período seleccionado. | Se toma del análisis para la curva de duración de caudal. Valores de percentiles de caudal específicos pueden ser interpolados con este valor. |
| Índice de caudal Base. Separación de flujos: modelo WETSPRO | Proporción de la escorrentía que se deriva de fuentes almacenadas. Representa las | Provee un índice que cuantifica la contribución relativa de las fuentes de | Se requiere una técnica de separación de caudal. Puede ser un filtro automático que aproxime la forma de la media diaria de los caudales |



| | | | |
|--|--|---|---|
| (Water Engineering Time Series PROcessing tool). | vías de agua que mantienen el flujo base del curso, (ej. suelos o aguas subterráneas). | “liberación lenta” al caudal en conjunto del curso de agua. | mínimos sobre una serie de tiempo. El BFI es entonces la relación entre el volumen bajo la curva de esta media de caudales mínimos, y el volumen bajo el Hidrograma total. |
| Tiempo de respuesta (LAG). | Tiempo transcurrido desde que ha caído la mitad del volumen de un evento de precipitación hasta que se produce el caudal máximo producto de esa precipitación. | El tiempo que demora una cuenca en reaccionar ante un evento de precipitación y alcanzar un valor pico. | Para un evento de precipitación dado, identificar el centro de gravedad del Hidrograma (gráfico de precipitación vs. tiempo). Para el mismo evento de precipitación identificar el tiempo en el que se produce el caudal más alto registrado como producto de ese evento. $LAG = (\text{tiempo en el que ocurre el caudal máximo ante un evento}) - (\text{tiempo del centro de gravedad del evento de precipitación})$. |
| Curva de duración de descarga (FDC). | Curva que muestra el porcentaje de tiempo durante el cual el caudal de una corriente es igual o mayor que los valores dados. | Este gráfico captura y permite ver el régimen de flujo completo de un período de tiempo seleccionado. | Se clasificó los datos: Los datos de caudal (diarios), fueron ordenados por magnitud, y luego se aplicó probabilidad de excedencia a cada valor. Se lo obtuvo realizando un gráfico de la curva de duración de descarga del registro a largo plazo de caudal. |

Fuente: Parámetros e Indicadores Hidrológicos para Ecosistemas Andinos – Iniciativa MHEA (Ochoa et al., 2012).



Al contar con información de caudales mensuales y anuales se conoce el volumen de agua que se tiene a lo largo del año, es decir, conocer la oferta de agua promedio que se tiene y se puede utilizar tanto para el consumo de la población como en el uso de las industrias.

A continuación se describe de manera más profunda la obtención del coeficiente de escorrentía, el índice de estacionalidad, índice de Separación de flujos: modelo WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool), índice de tiempo de respuesta (LAG), rango de descarga, en los puntos 3.4.1; 3.4.2; 3.4.3; 3.4.4 y 3.4.5, respectivamente con sus fórmulas y parámetros.

3.4.1 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía permite conocer cuál es la evapotranspiración promedio en cada una de las cuencas. La variación de este coeficiente implica un aumento o disminución de los otros dos elementos del balance, precipitación y caudal, y por lo tanto un cambio en la evapotranspiración que es un componente importante del régimen hidrológico (Célleri et al., 2004). Este valor calculado es uno de los aspectos básicos a determinar a la hora de gestionar los recursos agua y suelo, ya sea para su mejor aprovechamiento como su correcto manejo y conservación (Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2005). El coeficiente de escorrentía depende de la lluvia, de su cantidad, de su distribución en el tiempo, de la humedad inicial del suelo, tipo de terreno (rugosidad, micro relieve, pendiente, grado de compactación, materia orgánica, estructura, textura, granulometría), del tipo de cobertura vegetal existente y de la duración de la lluvia (horas, días, meses, un año, etc.), y puede tomar valores entre 0 y 1 (Azagra, 2006).

3.4.2 Análisis de estacionalidad

La estacionalidad de la precipitación se refiere a su grado de variabilidad mensual a lo largo del año, se calcula mediante el Índice de Estacionalidad (SI, por sus siglas en ingles), desarrollado por Walsh y Lawler en 1981. La distribución de la precipitación puede variar desde una distribución uniforme a lo largo del año hasta una concentración en pocos meses. Fue calculado con

cada estación pluviométrica, el mismo que se calcula con lluvias promedio mensuales y está dado por la ecuación 13.

$$SI_i = \frac{1}{R_i} \sum_{j=1}^{12} \left| M_{ij} - \frac{R_i}{12} \right|$$

Ecuación [13]

Donde: M_{ij} es el promedio de precipitación del mes j y R_i es la precipitación anual. Los autores del SI en el estudio “Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time” (Walsh & Lawler, 1981) establecen una clasificación de los regímenes de precipitación de acuerdo su valor obtenido, parámetros que se lo puede observar a detalle en la tabla 18.

Tabla 18. Regímenes estacionales según la clasificación del SI según Walsh P, Lawler, D.

| SI | Régimen de precipitaciones |
|-------------|---|
| <0,19 | Propagación de precipitaciones durante todo el año |
| 0,20 – 0,39 | Propagación de precipitaciones durante el año, pero con una estación de lluvia definida |
| 0,40 – 0,59 | No estacional con una corta estación seca |
| 0,60 – 0,79 | Estacional |
| 0,80 – 0,99 | Marcadamente estacional con una estación larga seca |
| 1,00 – 1,19 | La mayor parte de la precipitación en 3 meses |
| >1,20 | Estacional extrema con casi toda la precipitación en 1 o 2 meses |

Fuente: Estudio “Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time” (Walsh & Lawler, 1981).

El índice de estacionalidad proporciona una medida de dispersión de la lluvia mensual en relación a una distribución ideal uniforme de la precipitación en los 12 meses del año (Célleri, 2007). Sin embargo, la obtención del SI de precipitación durante solamente un año de datos no es correcto ni concluyente. En el estudio de “Rainfall variability and rainfall – runoff dynamics in the Paute river basin–Southern Ecuadorian Andes” (Célleri, 2007), llega a la conclusión

de que para obtener la variabilidad de precipitación se necesita información de al menos 30 años de datos. Por esta razón el SI obtenido para los diferentes pluviómetros de la gradiente en la zona de Tomebamba y Yanuncay, se usa para definir la variabilidad y el tipo de régimen de precipitación de cada estación de ese año, más no de la zona en general, a lo largo del transecto y hacer comparaciones con el estudio de “Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio una gradiente altitudinal” (Tapia, 2016), donde obtuvo los índices de estacionalidad para las estaciones pluviométricas que pertenecen a la cuenca de Tomebamba, dando lugar a un análisis de corroboración de datos.

Para ello hemos elaborado la gradiente altitudinal ajustada como se puede apreciar las figuras 5 y 6 de las cuencas Tomebamba y Yanuncay respectivamente. Estas gráficas confirman las distancias entre las estaciones analizadas.

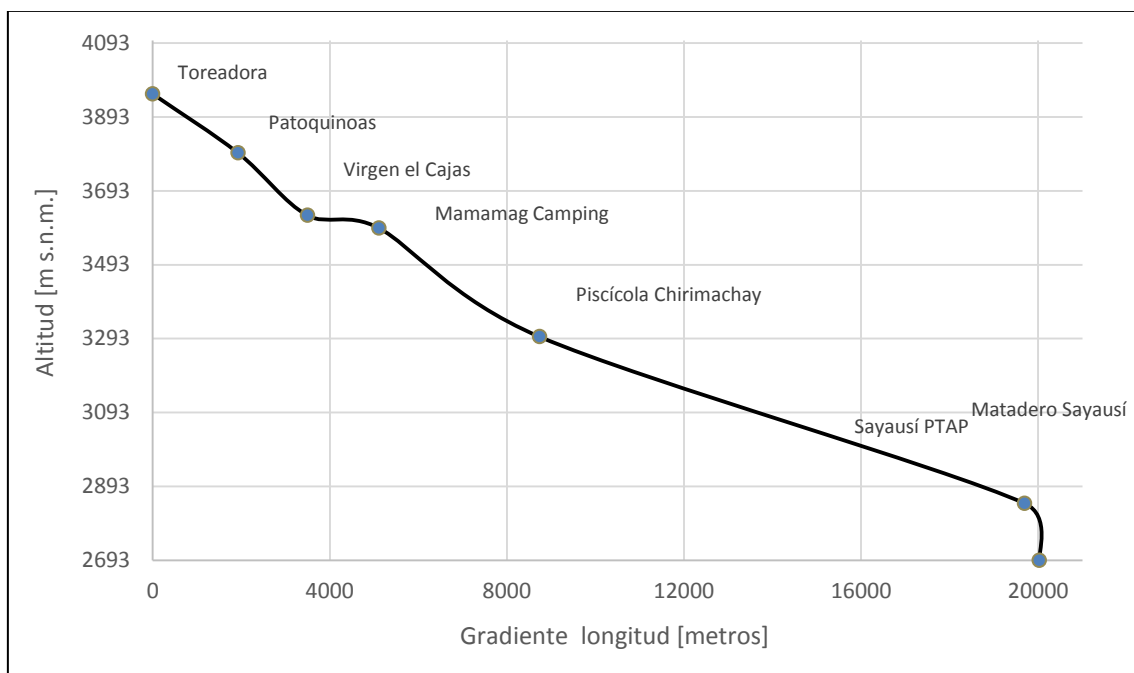


Figura 5. Gradiente altitudinal de la cuenca Tomebamba.

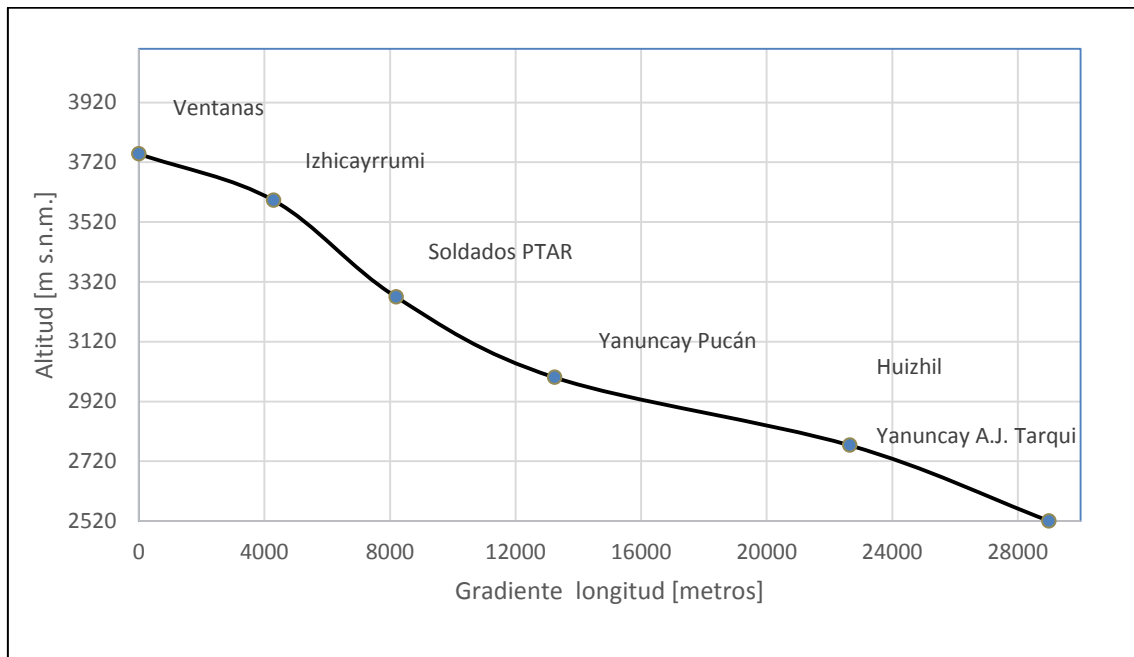


Figura 6. Gradiente altitudinal de la cuenca Yanuncay

Días secos

Se ha identificado el número de días secos, para ello es importante partir de una definición de sequía, este término puede tener una variedad de definiciones tanto conceptuales como operacionales. Aquellas definiciones operacionales sirven para analizar su frecuencia, severidad y duración en un período de tiempo histórico. En el estudio de “Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions” (Wilhite & Glantz, 1985), revisan más de 150 definiciones publicadas, donde se identifican cuatro tipos de sequías: meteorológica, agrícola, hidrológica y socio-económica.

Y para valorar un día como seco se establece un valor umbral. Este criterio seleccionado debe indicarse explícitamente para que la definición pueda ser evaluada y sea aplicable para otras zonas (Wilhite & Glantz, 1985). El día es meteorológico seco si en ese día no hay registro de precipitación. El día es



hidrológicamente seco si la precipitación registrada es menos a 1mm (Céleri, 2007). Y si se toma en cuenta la resolución del sensor, los días con precipitación menor a esta resolución, se consideran secos (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006). Con estas definiciones realizamos un análisis del porcentaje de días secos (Ver tabla 21), en el año, además de la variabilidad en las zonas de estudio.

3.4.3. Separación de flujos: modelo WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool)

Para llevar a cabo la modelización se separó los caudales en sus subflujos, utilizamos el software WETSPRO; su funcionamiento se detalla en la sección de anexos correspondiente al numeral 9.20, dicha información fue tomada del manual de utilización del programa (Willems, 2004).

Para el cálculo, se ingresó la series de tiempo en la hoja Input del programa, luego, en la hoja Subflow filtering ajustamos los parámetros, “constant term [unit of series]”, “initial flow value [unit of series]”, “number of filter steps”, “recession constant [number of time steps]”, “w-parameter filter [-]” y se corre el programa dando click en el botón “Execute baseflow”.

En la hoja “Filter results-BF” se comprobó que la línea amarilla, que corresponde a la pendiente de la constante de recesión, tenga la misma inclinación que los períodos de recesión en nuestra serie de caudales, y, además comprobamos que la línea de color rosa, que corresponde a la estimación del flujo base, empate con los puntos más bajos de la serie de tiempo de caudales observados, sin sobrepasarla para evitar sobreestimaciones o que no quede muy por debajo de la misma para evitar que se subestime este flujo. Los parámetros se calibran iterativamente y su correcta estimación se determina de forma visual.

Para un mejor entendimiento del programa se puede revisar la página oficial del Profesor Patrick Willems cuyo URL lo describimos a continuación: (<http://www.kuleuven.be/hydr/pwtools.htm>), sitio Web que contiene manuales,



protocolos, publicaciones científicas, videos de uso del programa, entre otros recursos para comprenderlo, o directamente en el manual del Programa WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool. KU Leuven Hydraulics Laboratory, Leuven Belgium (Willems, 2004).

3.4.4. Tiempo de respuesta

Conocido también como LAG, nos indica el tiempo que transcurre desde que ha caído la mitad del volumen de un evento de precipitación hasta que llega a producirse el caudal máximo, el cual es producto de esa precipitación. Este índice nos permitirá determinar el tiempo que demora una cuenca en reaccionar ante un evento de precipitación y alcanzar un valor pico.

Para determinar el evento de precipitación primero elaboramos el Hidrograma (Caudales de las cuencas vs. tiempo) para observar sus valores pico a una resolución de 5 minutos (m^3/s). Luego de identificar los picos en el caudal elaboramos el Hidrograma de precipitación (gráfico de precipitación vs. tiempo), también observando los eventos a una resolución de 5 minutos. Al sobreponer estos dos gráficos manteniendo el tiempo como una variable común entre ambos, (eje de las abscisas x), analizando la precipitación y caudal (eje de ordenadas y), logramos identificar que el día 21/04/2015 se presentó un desbordamiento aguas abajo del río Yanuncay y para Tomebamba (en el año 2015 no hubo desbordamiento), el día 26/04/2015, fecha en la cual se registró un mayor caudal en el río. Para estos eventos de caudal identificamos el tiempo en el que la precipitación produce el caudal más alto registrado. El LAG es igual tiempo en el que ocurre el caudal máximo ante un evento, menos el tiempo del centro de gravedad del evento de precipitación. Posteriormente realizamos la evaluación cuidadosa para asegurar la confiabilidad del dato, es decir que esté dentro de la tendencia de la serie, y que no sea claramente un valor fuera del comportamiento de datos vecinos (Ochoa et al., 2012).

3.4.5 Rango de descarga

Para calcular este indicador, no utilizamos los caudales específicos máximos y mínimos, con el fin de obtener una muestra representativa del total de datos de



caudal mediante la eliminación de valores de eventos extremos ocurridos en las dos cuencas, y también eliminar datos erróneos (picos), que desde la medición en los sensores puede existir niveles de caudal muy bajos, valores que los sensores no los miden o incluso dan datos mínimos cercanos a $0\text{m}^3/\text{s}$. Este indicador hidrológico nos sirve para determinar cuál de las dos cuencas analizadas tiene mejor regulación hídrica, para ello lo analizamos mediante los percentiles P5 y P95 según el protocolo de indicadores hidrológicos para ecosistemas andinos (Ochoa et al., 2012) y la publicación de “Cálculos Estadísticos en Hidrología” (Sánchez, 2013). Para comparar entre las dos cuencas normalizamos este valor dividiendo para el área de cada cuenca teniendo valores de caudales específicos en $\text{lt}/\text{s}/\text{km}^2$.

Con el programa Excel (hoja de cálculo electrónica) obtuvimos valores de quintiles, cuartiles, deciles y percentiles. Posteriormente con el programa RK Ward, logramos obtener los mismos valores en cuanto a quintiles, cuartiles, deciles y percentiles, de esta manera verificamos que los resultados son datos confiables y correctos., ya que es programa con un lenguaje de scripting para la informática – estadística, cuyo objetivo es proporcionar características útiles similares a las capacidades del programa de (R), y de una manera fácil de llevar a cabo las tareas de computación estadística.

3.5 Uso de suelo Vs. El comportamiento hidrológico

El conocimiento del uso del suelo constituye una información de gran importancia para poder predecir los efectos de las futuras acciones en materia de gestión de los recursos hídricos. Una clasificación de usos del suelo proporciona la mayor capacidad de explicación de comportamientos, por un lado hidrológico, de gran influencia en la generación de oferta y demandas del agua (Pozo de Castro, 2001).

Para determinar el uso de suelo se empleó el sistema de información geográfica (SIG). La elaboración de mapas, manejo y edición de datos, se realizaron mediante el análisis cartográfico de las coberturas vegetales y se interpretó las geoimágenes del año 2015.



Empleando ortofotos, shapes, u otros insumos cartográficos entregados por ETAPA EP, se modificó, analizó y determinó los porcentajes de uso de suelo en los parámetros mostrados en la tabla 36.

Finalmente, se obtuvo los siguientes resultados de las dos cuencas para sacar comparaciones, conclusiones, recomendaciones e ideas para investigaciones futuras.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados rellenos de datos

La diferencia entre los datos originales con los datos obtenidos en cada método, dio lugar a la validación de la mejor correlación. Es decir entre los cuatro métodos aplicados para rellenar la estación Patoquinoas, el mejor fue el método de Razones de Distancia (MRD). A continuación se presenta la relación (tabla 19) de los datos originales con el mejor método para relleno de datos en esta estación.

Tabla 19. Correlación de los 4 métodos utilizados para rellenar la estación Patoquinoas

| | DATOR | MRD | MRN | MPV | MRP |
|------|-------|------|------|------|-----|
| DAOR | 1 | | | | |
| MRD | 0,98 | 1 | | | |
| MRN | 0,90 | 0,75 | 1 | | |
| MPV | 0,77 | 0,70 | 0,71 | 1 | |
| MRP | 0,78 | 0,76 | 0,69 | 0,86 | 1 |

Zona de estudio Tomebamba: DATOR, Datos Originales; MRD, Método de Razones de Distancia; MRN, Método de la Razón-Normal; MPV, Método de Promedios Vecinales; MRP, Método de Razones Promedio.

Llegando al resultado como se lo puede apreciar en la tabla 20, de que todos los métodos empleados se correlacionan muy bien, a pesar de estos buenos resultados se ve el el Método de Razones de Distancia sobresale como el mejor, ya que tiene menor porcentaje (0,96%) de error y tiene mayor coeficiente de correlación con los datos originales de la estación Patoquinoas



(0,98), así completamos la serie de datos de esta estación de (01/01/2015 0:00:01) – (31/12/2015 0:00:01).

Tabla 20. Resultados de los diferentes métodos para la estación Patoquiños

| | DATOR | MRD | MRN | MPV | MRP |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Precipitación anual (mm) | 778,10 | 785,63 | 814,99 | 833,77 | 822,48 |
| Porcentaje error (%) | 0 | 0,96 | 4,53 | 6,68 | 5,4 |

Zona de estudio Tomebamba: DATOR, Datos Originales; MRD, Método de Razones de Distancia; MRN, Método de la Razón-Normal; MPV, Método de Promedios Vecinales; MRP, Método de Razones Promedio.

Al terminar de realizar los métodos de relleno se logró obtener una serie de datos diarios completa (0% datos vacíos) de la cuenca Tomebamba, al igual que en la cuenca Yanuncay.

Los datos fueron analizados de forma estricta, con la finalidad de emplearlos en el cálculo del cierre del balance hídrico de cada una de las cuencas de este estudio.

4.2. Regímenes de precipitación

Se determinan los meses más lluviosos y secos para las dos cuencas, utilizando datos de precipitaciones medias mensuales de cada estación. En la figura 7 se observa que el régimen de precipitaciones de las dos cuencas es similar en su comportamiento, sin embargo en la cuenca Tomebamba se registró una precipitación promedio de 1007,49 mm de lluvia, mientras que Yanuncay solo 829,94 mm de lluvia en el año de estudio.

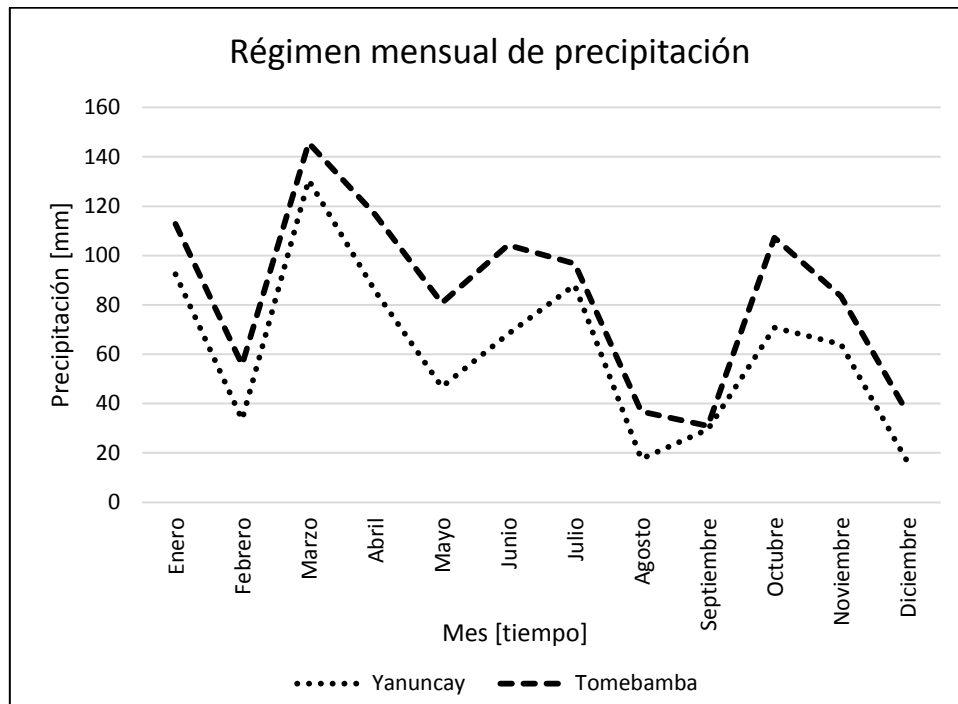


Figura 7. Régimen mensual de precipitaciones de las dos cuencas de estudio

Estas dos cuencas presentan un aumento de precipitación en el mes de febrero hasta abril, siendo la precipitación mayor en el mes de marzo; y una baja precipitación en agosto y septiembre, estos datos coincidentes puede deberse a que son cuencas anexas o juntas. Es notorio que los períodos de verano e invierno de las dos cuencas son iguales. También analizamos los porcentajes de días sin y con lluvia para el período de estudio.

A continuación en la tabla 21, se detalla el número de días seco con y sin precipitación en cada cuenca estudiada.

Tabla 21. Porcentaje de días con y sin lluvia para las dos cuencas durante el año completo 2015.

| | Tomebamba | Yanuncay |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|
| Días sin precipitación | 28 | 62 |
| Porcentaje de días sin lluvia | 7,67 % | 16,98% |
| Días con precipitación | 337 | 303 |
| Porcentaje de días con lluvia | 92,33% | 83,02% |

En la cuenca Tomebamba tiene un mayor número de días de precipitación que Yanuncay, por lo que se justifica el análisis pareado de ciertos índices que se verán más adelante.

En la figura 8, la cuenca de Tomebamba los valores altos de precipitación la presenta la estación Piscícola Chirimachay (3298 m s.n.m.), Mamamag Camping (3592 m s.n.m.) y Patoquinoas (3795 m s.n.m.) son estaciones que se encuentran en la cuenca media, indicando que no necesariamente precipita más en las cimas de las montañas sino en las laderas, y que los valores bajos de precipitación las presentan Patoquinoas (3795 m s.n.m.), Toreadora (3955 m s.n.m.), Virgen el cajas (3626 m s.n.m.), Matadero Sayausí (2693 m s.n.m.), Sayausí en la PTAP (2847 m s.n.m.), estas estaciones están en la cuenca baja y alta.

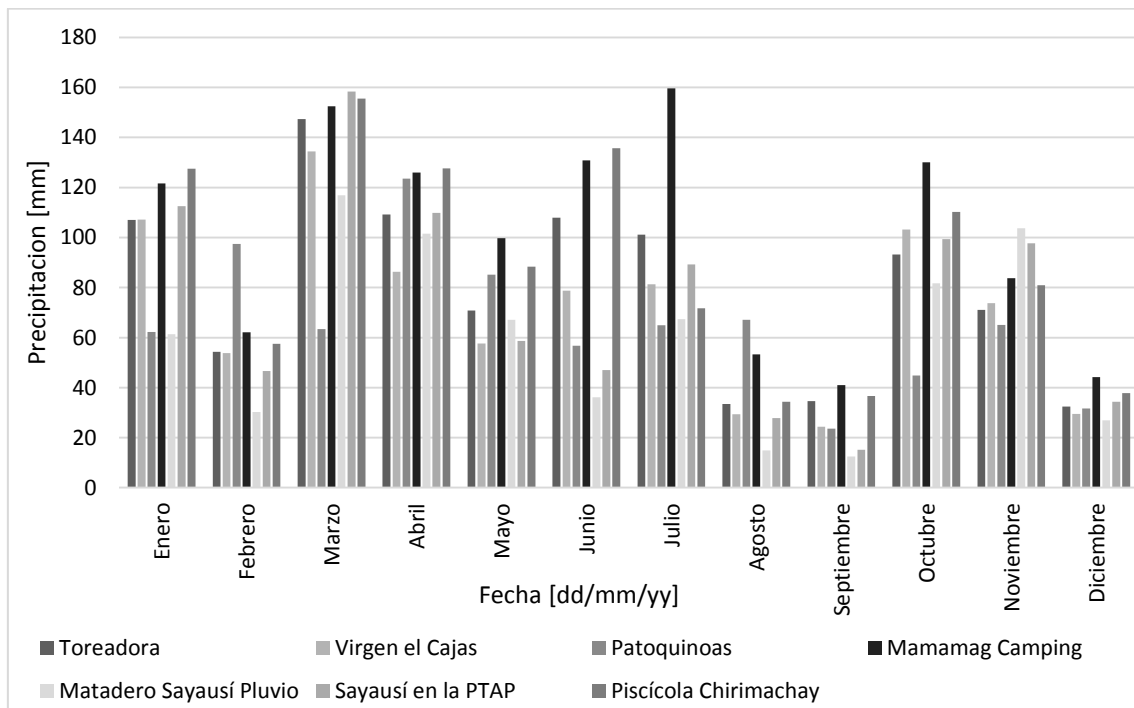


Figura 8. Regímenes de datos pluviométricos en la cuenca Tomebamba

Sobre la zona de Yanuncay (figura 9), los valores máximos de precipitación se dieron en la estación de Yanuncay en Pucán (3000 m s.n.m.) ubicada en la cuenca media, mostrando que al igual que en Tomebamba existe mayor

precipitación en las laderas; los valores mínimos se obtuvieron en la estación de Huizhil (2773 m s.n.m.) la que se encuentra a menor altitud.

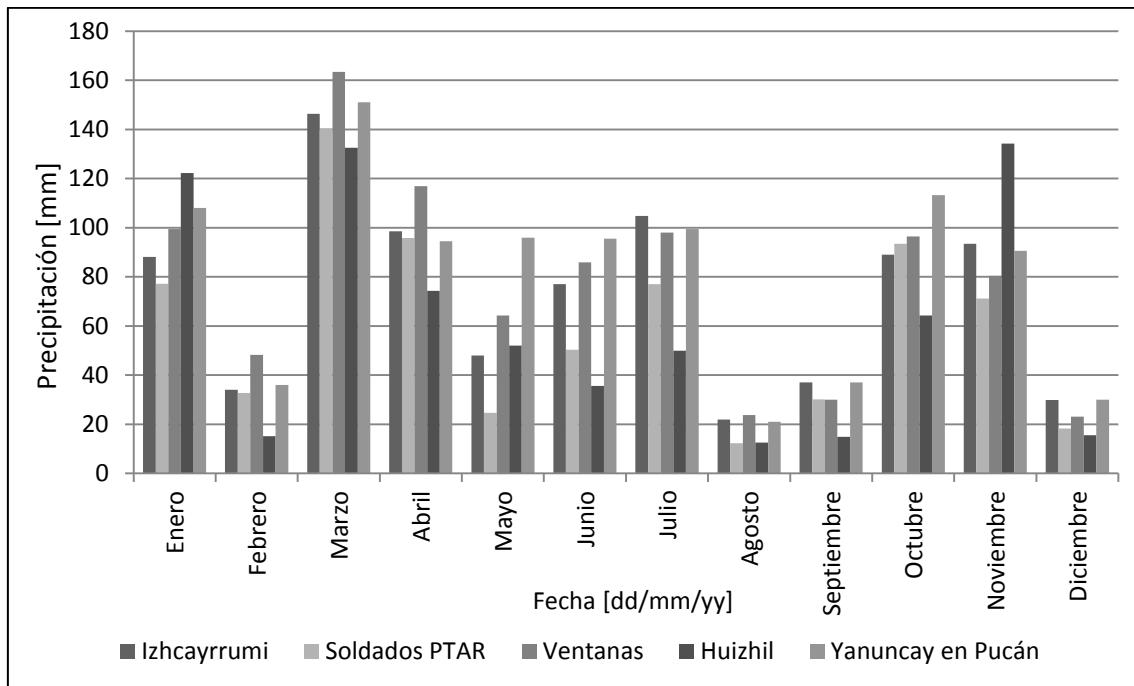


Figura 9. Regímenes de datos pluviométricos en la cuenca Yanuncay.

4.3. Balance Hídrico

Se determinó el balance hídrico general con el fin de conocer el porcentaje de precipitación que se convierte en caudal. Para ello en la tabla 22 se puede observar el volumen del caudal, evapotranspiración y la precipitación mensual expresados en las mismas unidades (mm).

Tabla 22. Balance hídrico de las dos cuencas estudiadas.

| Zona de estudio | Precipitación (mm) | Evapotranspiración (mm) | Caudal (mm) | Balance (mm) |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------|--------------|
| Tomebamba | 1007,49 | 515,00 | 492,49 | 0,11 |
| Yanuncay | 829,94 | 448,94 | 381,03 | -0,03 |

A continuación en la siguiente tabla 23 se describe en porcentajes el balance hídrico para una mejor apreciación de los valores anteriores.

Tabla 23. Balance hídrico de las dos cuencas estudiadas.

| Cuenca | Precipitación | Caudal | Evapotranspiración |
|------------------|---------------|---------|--------------------|
| Tomebamba | 100 % | 48,88 % | 51,11 % |
| Yanuncay | 100 % | 45,91 % | 54,09 % |

En la figura 10 se presenta el balance hídrico de Tomebamba. Se observa que en promedio el mes más lluvioso en esta cuenca es el mes de marzo. El caudal representa el 48,88 % de la precipitación media anual de la misma.

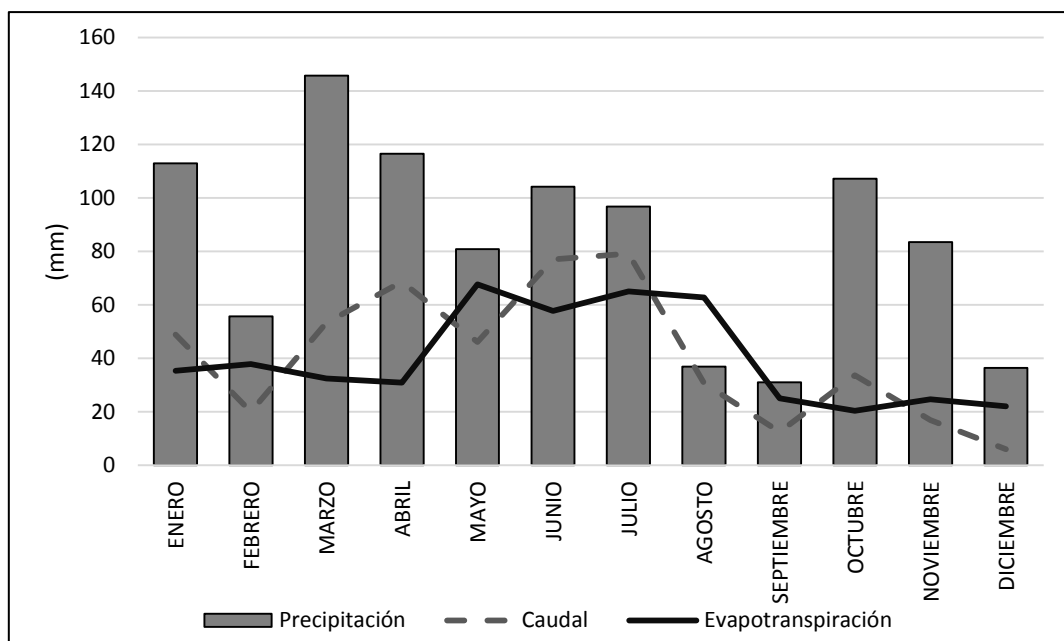


Figura 10. Balance hídrico de Tomebamba

En la figura 11 se observa el balance hídrico de Yanuncay. Se puede apreciar que el mes promedio más lluvioso de la cuenca de Yanuncay es también en el mes de marzo. El caudal en esta cuenca representa el 45.91% de la precipitación media anual de la misma.

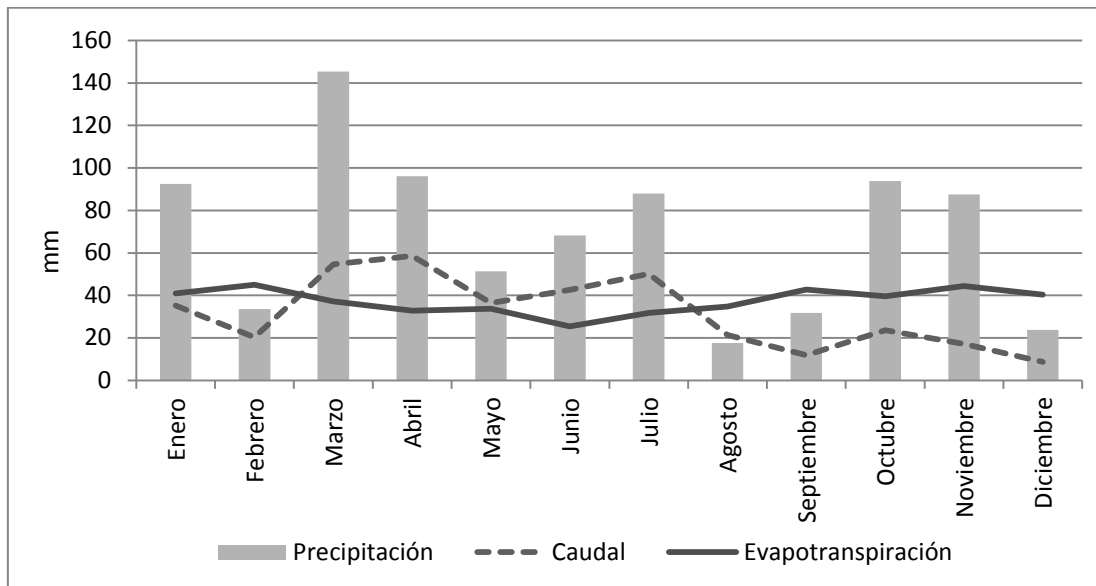


Figura 11. Balance hídrico de Yanuncay

4.4 Análisis del efecto de la densidad de las estaciones sobre el cierre del balance hídrico de las cuencas estudiadas

Para realizar este análisis se considera que con el total de estaciones en cada una de las cuencas obtenemos valores exactos de balance hídrico. Se consideran las 7 y 5 estaciones para la cuenca del Tomebamba y Yanuncay respectivamente, luego se calculó el porcentaje del error cuando se eliminó estación por estación.

En la tabla 24 se observa que en la cuenca Tomebamba existe un mayor error con una sola estación (Piscícola Chirimachay que es la estación histórica) el error encontrado fue de 5,60%, con cuatro estaciones (Virgen el Cajas, Toreadora, Matadero Sayausí, Piscícola Chirimachay) el error fue 5,16%, con tres estaciones (Toreadora, Matadero Sayausí, Piscícola Chirimachay) el error fue de 2,64%, con dos estaciones (Matadero Sayausí, Piscícola Chirimachay) el error fue de 0,25%, este valor no es determinante ya que con las 3 estaciones para ambas cuencas en estudio, el error es el más grande y debajo de este número de estaciones es considerado como falta de estaciones. Es decir se puede tener una buena captación de información en la cuenca



Tomebamba con un error menor a 0,62% con 7, 6 y 5 estaciones ubicadas como se muestra en la figura 12.

En la cuenca de Yanuncay según la tabla 24, se observa que el porcentaje del error aumenta cuando analizamos el balance con un número menor de estaciones. Es decir, al eliminar las estaciones para el balance, la realidad de la lluvia de la cuenca presenta variaciones en los valores, pues los eventos de precipitación se escapan del rango de cobertura de la estación, a ello argumentamos que, una estación no es capaz de captar todos los fenómenos integrados que ocurren en toda la cuenca. Para esta zona de estudio el error es mayor al emplear una sola estación (Yanuncay en Pucán es la estación histórica), y el error es menor si en esta cuenca se colocan como mínimo las 3 estaciones (2,13%), pero no menos de esto como se aprecia también en la figura 13.

Tabla 24. Cálculo del error (%) en el balance hídrico.

| Nombre Cuenca | Pluviómetros (#) | Precipitación (mm) | Error Relativo (%) |
|----------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Yanuncay | 5 | 829,94 | 0 |
| | 4 | 853,27 | 2,81 |
| | 3 | 847,65 | 2,13 |
| | 2 | 910,57 | 9,72 |
| | 1 | 972,45 | 17,17 |
| Tomebamba | 7 | 1007,50 | 0,00 |
| | 6 | 1011,65 | 0,41 |
| | 5 | 1001,29 | 0,62 |
| | 4 | 955,51 | 5,16 |
| | 3 | 980,91 | 2,64 |
| | 2 | 1004,94 | 0,25 |
| | 1 | 1063,94 | 5,60 |

A continuación presentamos las figuras 12 y 13 donde se puede observar la eliminación de las estaciones conforme se explicó en el punto 3.3.

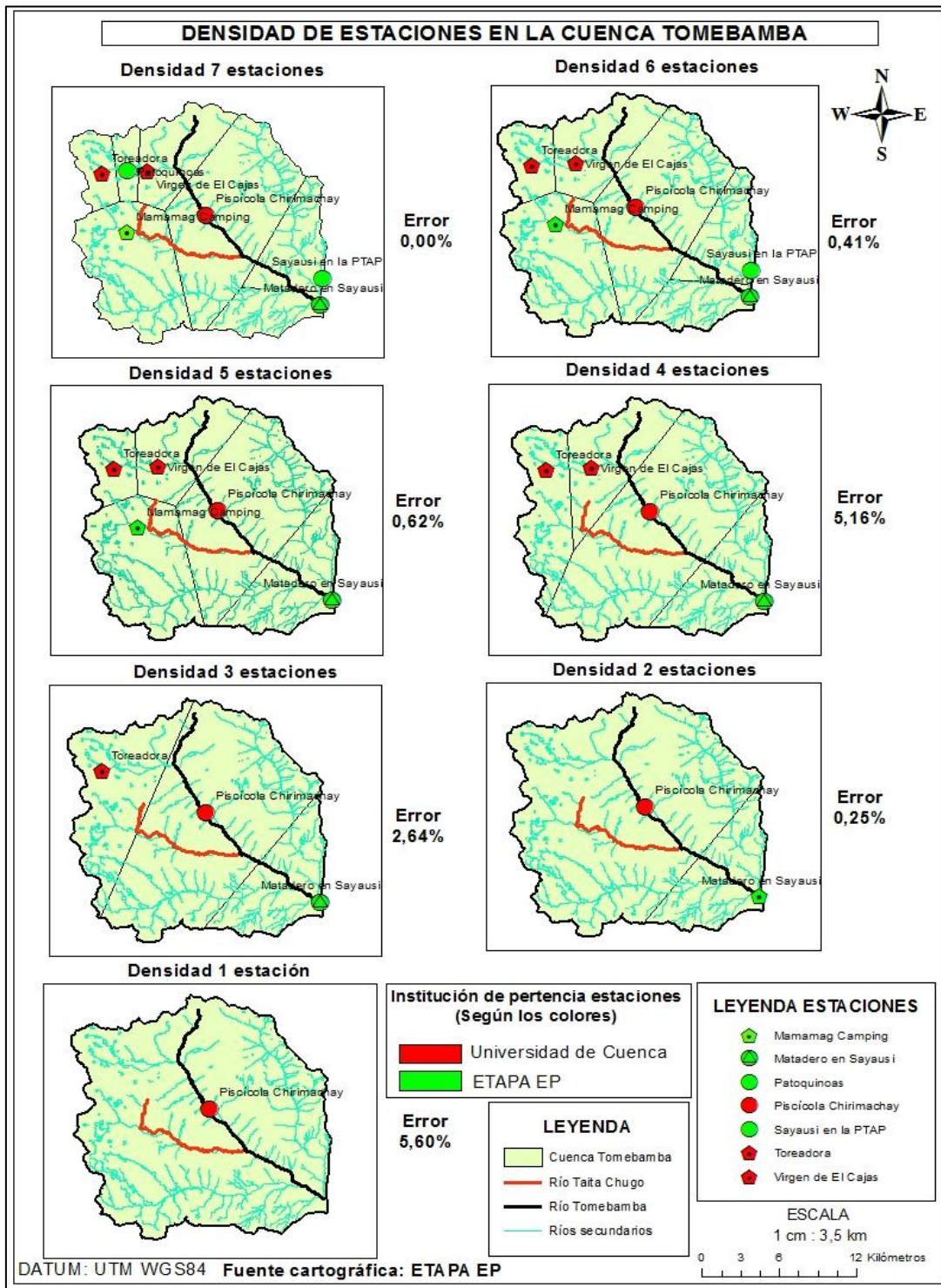


Figura 12. Efecto de la densidad de estaciones en el balance hídrico de la cuenca Tomebamba. Modificación Cartográfica: Autores

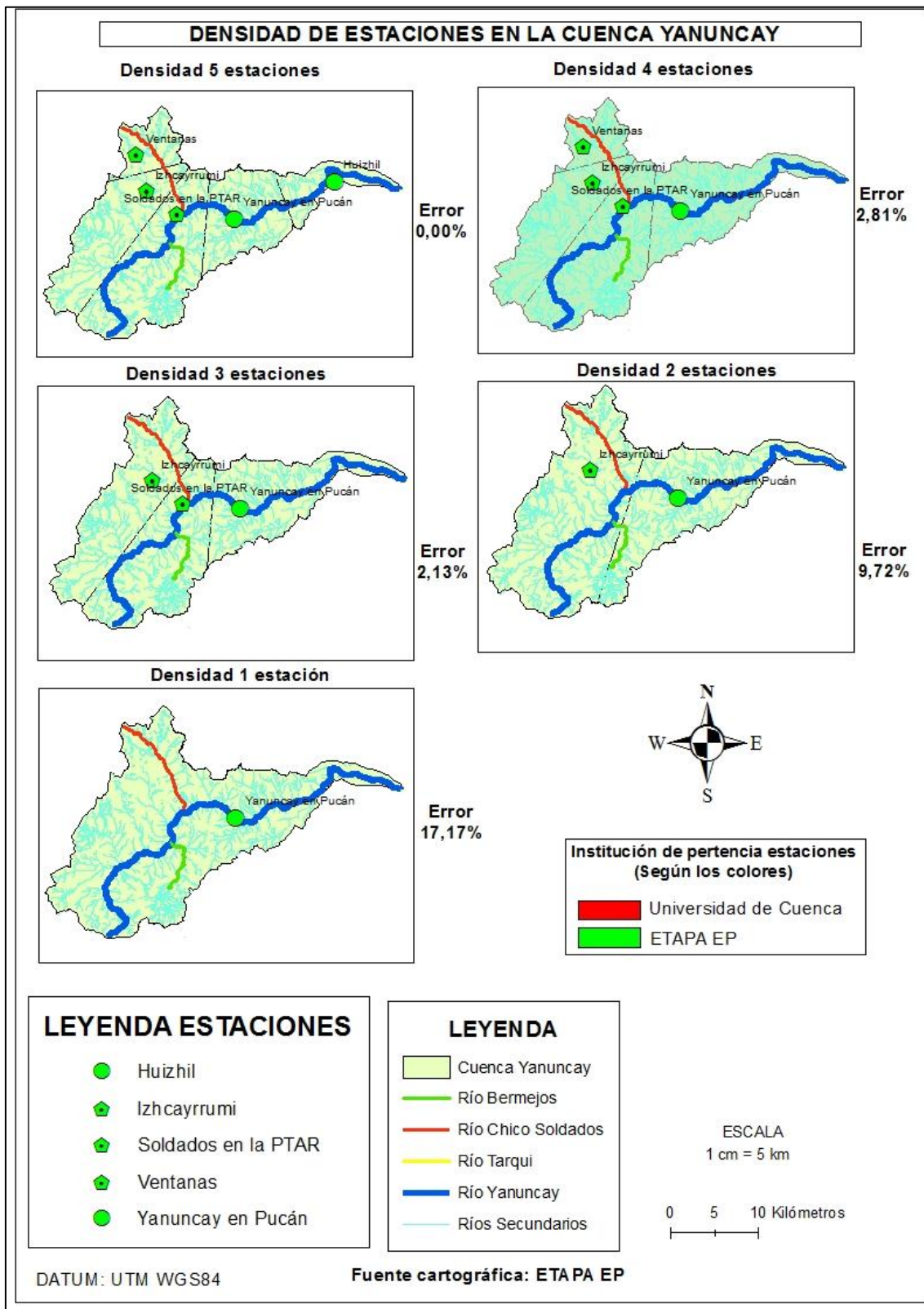


Figura 13. Efecto de la densidad de estaciones en el balance hídrico de la cuenca Yanuncay. Modificación Cartográfica: Autores

4.5. Análisis de la distribución espacial del volumen acumulado de lluvia

Se obtuvo este análisis del volumen acumulado de la lluvia de las dos cuencas del año 2015 (ene-dic), de acuerdo a la observación de sus valores y su grado de variabilidad mediante el coeficiente de variación.

En la figura 14 se aprecia un comportamiento similar entre las 7 estaciones, tomando en cuenta también los coeficientes de correlación entre estaciones se comprueba la similitud entre estas, su volumen fluctúa entre 720,50 mm (11,1 %) y 1204,80 mm (18,55 %).

La mayor diferencia se presenta entre Matadero Sayausí (2693 m s.n.m.) y Mamamag Camping (3592 m s.n.m.), esta característica puede darse debido al efecto orográfico que produce la presencia del macizo del Cajas, existiendo una diferencia de altura entre cotas de 899 metros.

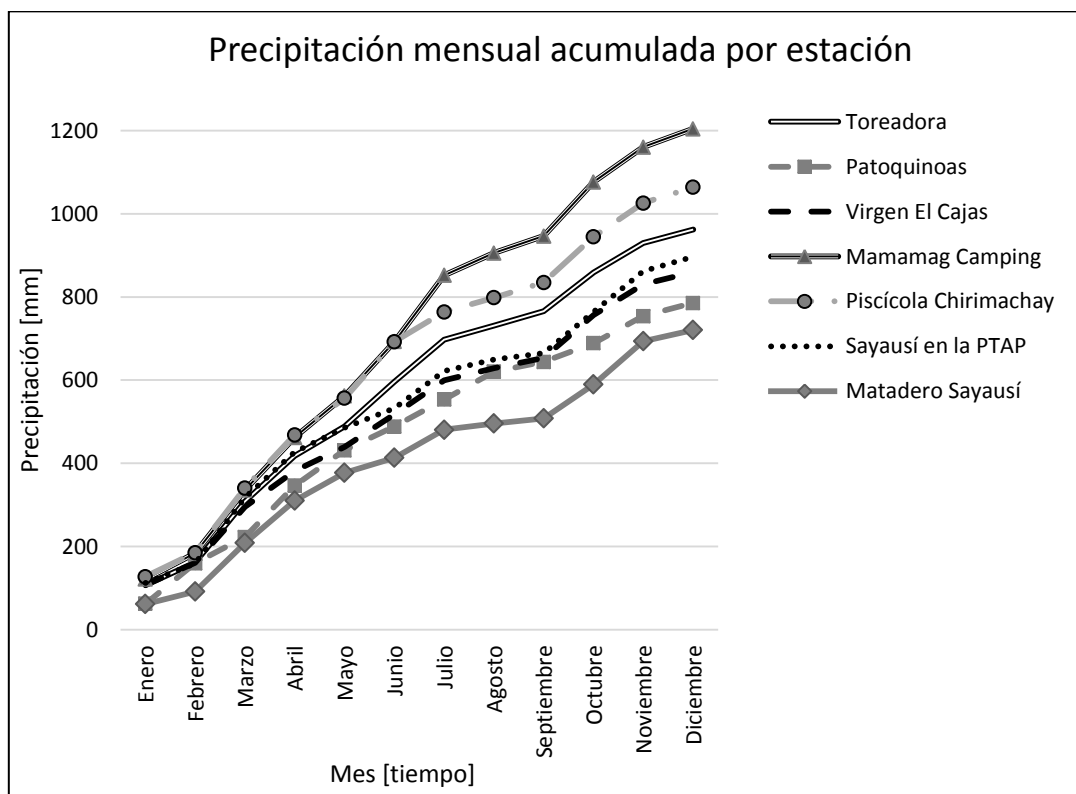


Figura 14. Volumen acumulado de la lluvia de las estaciones de la cuenca de Tomebamba

De acuerdo al comportamiento de la curva del volumen acumulado de lluvia de las 5 estaciones (figura 15) se aprecia que estas se comportan de manera similar, lo cual fue corroborado por los coeficientes de correlación entre estaciones, sin embargo, su volumen fluctúa entre 723,7 mm (17,16%) y 972,45 mm (23,5%).

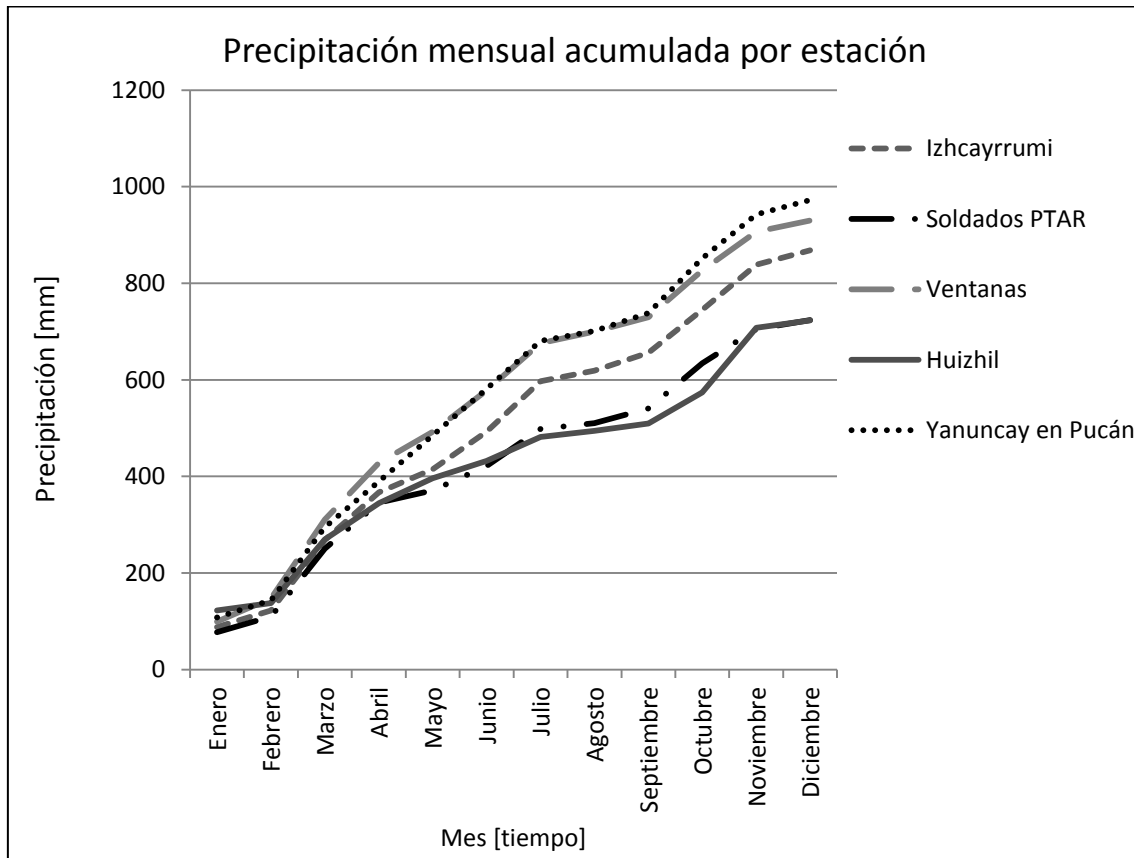


Figura 15. Volumen acumulado de la lluvia de las estaciones de la cuenca de Yanuncay

La mayor diferencia se presenta entre las estaciones de Huizhil y Yanuncay en Pucán, esta característica puede ocurrir debido al efecto orográfico que produce la presencia del macizo del Cajas en esta dirección, la cual se hace más notoria desde las zonas ubicadas cerca de la estación Yanuncay en Pucán (3000 m s.n.m.). Las nubes provenientes del Este, al encontrarse con la parte baja del macizo del Cajas comienzan a acumularse de mayor manera,

produciendo el aumento de humedad en las nubes, las cuales posteriormente precipitan (Vasco et al., 2012).

4.6. Análisis de estacionalidad

En el análisis de la estacionalidad de las zonas estudiadas, como se puede observar en la tabla 25, se calculó el índice de estacionalidad (SI) del año 2015, para cada una de las estaciones pluviométricas, esto en base a las precipitaciones mensuales y anuales.

Tabla 25. Índice de estacionalidad del año 2015, de cada estación en las dos cuencas estudiadas.

| cuenca | Nombre Estaciones | SI | Régimen de Precipitaciones. |
|-----------|-------------------|------|---|
| Yanuncay | IZH | 0,44 | Algo estacional con una estación corta seca |
| | SOP | 0,53 | Algo estacional con una estación corta seca |
| | VEN | 0,43 | Algo estacional con una estación corta seca |
| | HUI | 0,63 | Estacional |
| | YAP | 0,41 | Algo estacional con una estación corta seca |
| Tomebamba | TOR | 0,38 | Propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida |
| | VEC | 0,38 | Propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida |
| | PAT | 0,28 | Propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida |
| | MAC | 0,36 | Propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida |
| | MAS | 0,50 | Algo estacional con una estación corta seca |
| | SAP | 0,49 | Algo estacional con una estación corta seca |
| | PIC | 0,40 | Algo estacional con una estación corta seca |

Zona de estudio Yanuncay: IZH, Izhcayrrumi; SOP, Soldados PTAR; VEN, Ventanas; HUI, Huizhil; YAP, Yanuncay en Pucán. **Zona de estudio Tomebamba:** TOR, Toreadora; VEC, Virgen El Cajas; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; MAS, Matadero Sayausí; SAP, Sayausí PTAP; PIC, Piscícola Chirimachay.

Para las estaciones pertenecientes a Yanuncay todas presentan un régimen de Algo estacional con una estación corta seca, a excepción de Huizhil que presenta un régimen estacional. En la cuenca Tomebamba existen tres estaciones con un régimen “Algo estacional con una estación corta seca”, y cuatro estaciones con un régimen “Propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida”. En las dos cuencas todas las estaciones de precipitación muestran que tienen una propagación de lluvia durante todo el año, con una estación lluviosa definida para los meses de: enero, marzo, abril y octubre. Por otro lado los meses más secos fueron los de: febrero, agosto, septiembre y diciembre.

A continuación en la siguiente figura 16, se observa los índices de estacionalidad de cada estación pluviométrica.

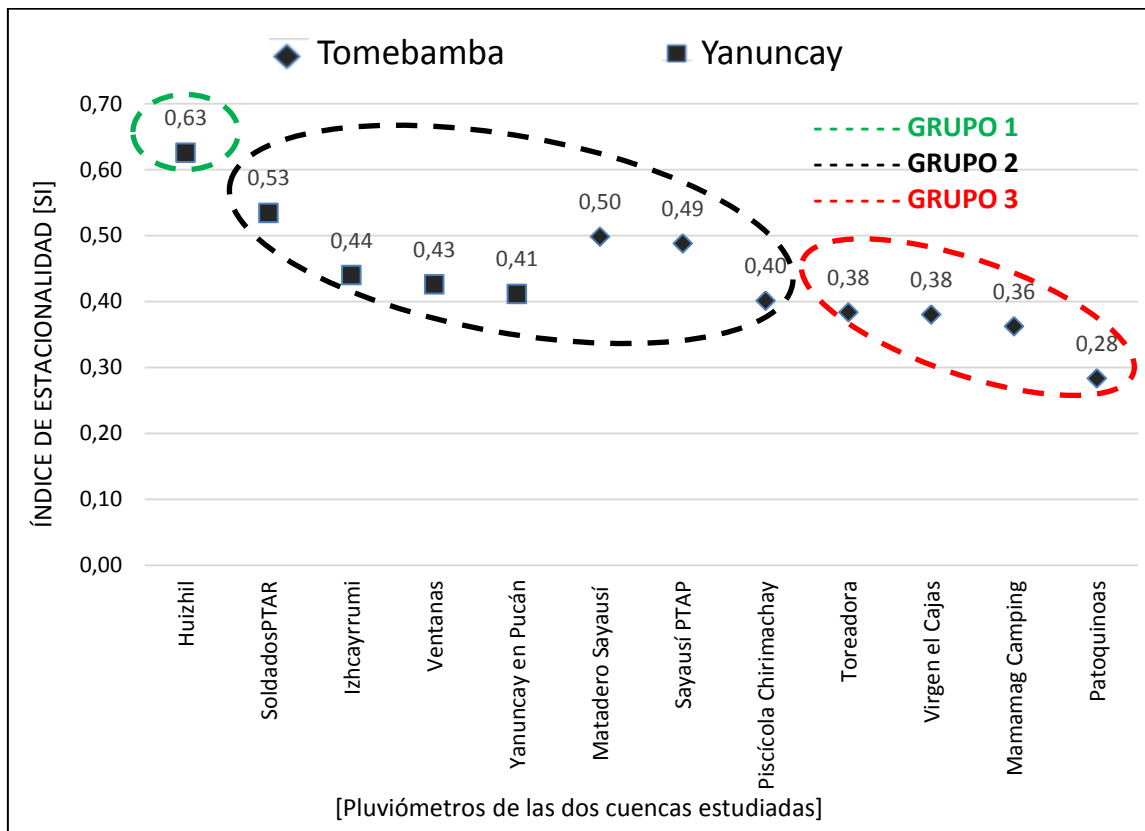


Figura 16. Índice de estacionalidad de las dos cuencas en referencia a las elevaciones de las estaciones pluviométricas



El grupo 1 (Toreadora, Virgen El Cajas, Mamamag Camping y Patoquinoas) presenta un régimen de precipitación uniforme durante el año, pero con una estación de lluvia definida. El grupo 2 (Soldados PTAR, Izhcayrumi, Ventanas, Yanuncay en Pucán, Matadero Sayausí, Sayausí PTAP, Piscícola Chirimachay) presenta un régimen de precipitación algo estacional con una corta estación seca. El grupo 3 (Huizhil) presenta un régimen de precipitación estacional. Tal como lo señala (Céleri, 2007) la estacionalidad es menos pronunciada a elevaciones mayores, es decir, mientras se va ganando altura, el SI disminuye su valor. En la figura 16 se pueden observar los valores del índice obtenido para las doce estaciones pluviométricas, en donde se identifica claramente el cambio de estacionalidad entre las estaciones de Toreadora - Piscícola Chirimachay (Tomebamba) y el salto entre Soldados PTAR - Huizhil (Yanuncay).

En la tabla 26 se detallan los valores entre el índice de estacionalidad obtenido en nuestro estudio (Autores 2015), con los resultados obtenidos en el estudio de (Tapia, 2016), quien realizó el estudio con datos del año 2014.

Tabla 26. Comparación del SI, entre los dos estudios (año 2015 y el año 2014)

| Código | SI 2015 (A.C. y M.J.) | SI 2014 (D.T.) | Coinciden / No coinciden |
|--------|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| TOR | 0,38 | 0,31 | SI |
| PIC | 0,40 | 0,31 | NO |
| VEC | 0,38 | 0,33 | SI |
| MAS | 0,50 | 0,48 | SI |
| PAT | 0,28 | - | - |
| MAC | 0,36 | - | - |
| SAP | 0,49 | - | - |
| BAL | - | 0,60 | - |
| OFI | - | 0,48 | - |

Zona de estudio Tomebamba: TOR, Toreadora; PIC, Piscícola Chirimachay; VEC, Virgen El Cajas; MAS, Matadero Sayausí; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; SAP, Sayausí PTAP; BAL, Balzaín; OFI, Oficinas; A.C. y M.J., Estudio Autores; D.T., Estudio JuDiego Tapia .



Al comparar con el estudio de “Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio una gradiente altitudinal” (Tapia, 2016), las estaciones de Toreadora, Virgen el Cajas, coinciden en que tienen una propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida, es decir presenta una distribución más uniforme a lo largo del año. Igualmente ocurre una coincidencia en los valores de Matadero Sayausí, ya que tiene un régimen no estacional con una corta estación seca.

En la estación de Piscícola Chirimachay se observa una no coincidencia en los datos, ya que en el estudio de (Tapia, 2016), esta estación presenta una propagación de precipitaciones durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida, y mientras que nuestro estudio (Autores 2015), presenta un régimen algo estacional con una estación corta seca, esto se debe a estos resultados pueden variar su valor de año a año, por las variabilidad de las condiciones climáticas (Célleri, 2007), ya que para definirlo es necesario tener como datos al menos 30 años de información, es decir que estos resultados tienen que ser comparados con muchos años más para determinar si nuestro dato es o no un dato atípico.

4.7 Indicadores hidrológicos

4.7.1 Precipitación mensual

En las tablas 27 y 28 se muestran las precipitaciones mensual y anual (2015), de las cuencas de nuestro estudio obtenidos con por medio de los polígonos de Thiessen.

Tabla 27. Precipitación mensual de cada estación en la zona Tomebamba.

| | TOR | VEC | PAT | MAC | MAS | SAP | PIC |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ene | 107,00 | 107,20 | 62,20 | 121,60 | 61,40 | 112,50 | 127,50 |
| Feb | 54,30 | 53,80 | 97,40 | 62,10 | 30,30 | 46,60 | 57,50 |
| Mar | 147,30 | 134,40 | 63,40 | 152,50 | 116,90 | 158,40 | 155,60 |
| Abr | 109,20 | 86,30 | 123,60 | 126,00 | 101,60 | 109,80 | 127,70 |
| May | 70,80 | 57,70 | 85,10 | 99,80 | 67,10 | 58,60 | 88,40 |
| Jun | 107,90 | 78,70 | 56,80 | 130,80 | 36,10 | 47,00 | 135,72 |
| Jul | 101,20 | 81,30 | 64,90 | 159,70 | 67,40 | 89,20 | 71,68 |
| Ago | 33,40 | 29,40 | 67,10 | 53,30 | 14,90 | 27,80 | 34,32 |
| Sep | 34,60 | 24,40 | 23,60 | 41,00 | 12,50 | 15,10 | 36,62 |
| Oct | 93,20 | 103,20 | 44,85 | 130,10 | 81,70 | 99,40 | 110,20 |
| Nov | 71,10 | 73,80 | 65,08 | 83,70 | 103,70 | 97,70 | 80,90 |
| Dic | 32,40 | 29,50 | 31,60 | 44,20 | 26,90 | 34,40 | 37,80 |
| PROM | 80,20 | 71,64 | 65,47 | 100,40 | 60,04 | 74,71 | 88,66 |

Zona de estudio Tomebamba: TOR, Toreadora; VEC, Virgen El Cajas; PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; MAS, Matadero Sayausí; SAP, Sayausí PTAP; PIC, Piscícola Chirimachay.

En esta zona de Tomebamba se observó que la estación que registró mayor precipitación promedio en el año 2015 fue Mamamag Camping con 100,40 mm. Mientras que en la zona de Yanuncay la estación que registró mayor cantidad de precipitación promedio fue Yanuncay en Pucán con 81,04 mm.



Tabla 28. Precipitación mensual de cada estación en la zona Yanuncay

| | IZH | SOP | VEN | HUI | YAP |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Ene | 88,10 | 77,20 | 99,50 | 122,30 | 108,00 |
| Feb | 34,10 | 32,80 | 48,20 | 15,20 | 36,00 |
| Mar | 146,40 | 140,40 | 163,39 | 132,50 | 151,00 |
| Abr | 98,60 | 95,80 | 116,94 | 74,30 | 94,50 |
| May | 48,00 | 24,70 | 64,34 | 52,00 | 96,00 |
| Jun | 77,10 | 50,40 | 85,90 | 35,60 | 95,50 |
| Jul | 104,80 | 77,00 | 98,00 | 50,00 | 99,50 |
| Ago | 21,90 | 12,30 | 23,80 | 12,60 | 21,00 |
| Sep | 37,00 | 30,10 | 30,00 | 14,90 | 37,03 |
| Oct | 89,00 | 93,50 | 96,50 | 64,30 | 113,24 |
| Nov | 93,40 | 71,20 | 80,50 | 134,24 | 90,60 |
| Dic | 29,90 | 18,30 | 23,10 | 15,54 | 30,08 |
| PROM | 72,36 | 60,31 | 77,51 | 60,29 | 81,04 |

Zona de estudio Yanuncay: IZH, Izhcayrrumi; SOP, Soldados PTAR; VEN, Ventanas; HUI, Huizhil; YAP, Yanuncay en Pucán.

A continuación presentamos en la figura 17 un mapa de precipitación promedio registrada durante el año 2015 en las dos zonas de estudio.

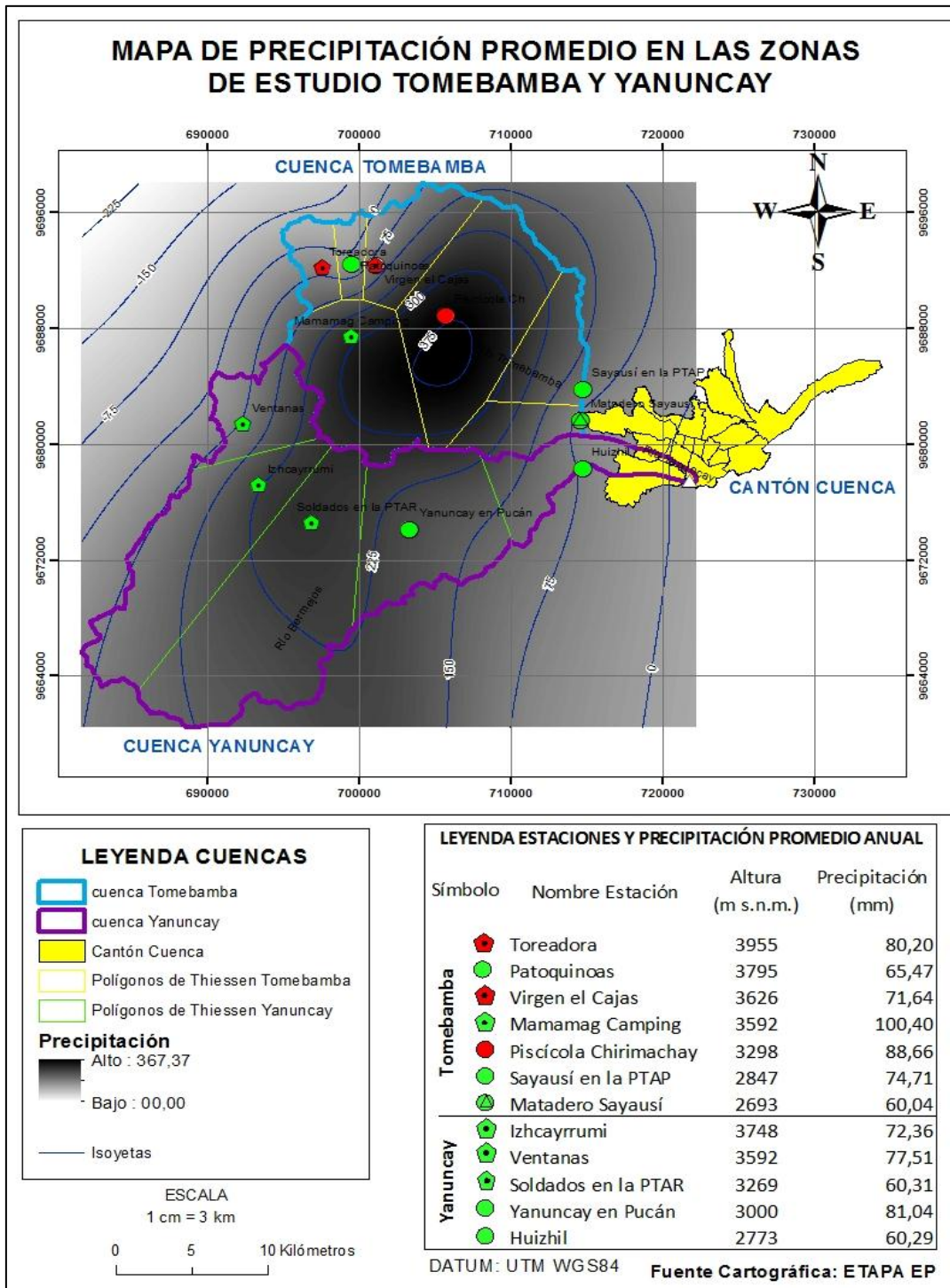


Figura 17. Mapa de precipitación promedio de las dos cuencas estudiadas.
Modificación Cartográfica: Autores

4.7.2. Caudales máximos, mínimos, medios diarios

Se determinó los valores de los caudales máximos, mínimos y medios con datos diarios durante el año 2015 para cada cuenca. Los cuales pueden apreciarse en la tabla 29.

Tabla 29. Caudal específico promedio, máximo y mínimo de cada cuenca.

| | Tomebamba | Yanuncay |
|---|------------------|-----------------|
| Q promedio diario (lt/s/km ²) | 15,62 | 12,08 |
| Q máx. diario (lt/s/km ²) | 151,69 | 70,29 |
| Q mín. diario (lt/s/km ²) | 0,13 | 2,24 |

Mediante estos resultados podemos observar que el promedio diario de caudal de la cuenca de Tomebamba es mayor al de Yanuncay, pero presenta un caudal mínimo inferior.

4.7.3 Análisis de disponibilidad hídrica

Los indicadores que utilizamos para realizar el análisis de la disponibilidad hídrica para cada una de nuestras zonas de estudio son los que se muestran en la tabla 30.

Tabla 30. Indicadores de disponibilidad del recurso hídrico.

| Indicador | Unidad | Tomebamba | Yanuncay |
|--|----------------------|------------------|-----------------|
| Precipitación anual promedio ponderada con polígonos de Thiessen | mm | 1007,49 | 829,94 |
| Caudal o volumen medio anual. | lt/s/km ² | 15,62 | 12,08 |
| Diferencia entre precipitación y caudal anual. | mm | 515 | 448,94 |
| Índice de Estacionalidad promedio de cada cuenca (SI) | - | 0,36 | 0,45 |
| Coefficiente de escurrentía. | - | 0,49 | 0,45 |



Los resultados obtenidos para el año 2015 de precipitación dieron como resultado que existe mayor cantidad de lluvia en la cuenca de Tomebamba con 1007,49 mm con respecto a los 829,94 mm de Yanuncay, se establece una diferencia de 177,55 mm; es decir, que Yanuncay representa el 82,38% de total de lluvia que precipitó en Tomebamba en el año 2015.

El promedio diario de caudal de la cuenca de Tomebamba es mayor al de Yanuncay, por lo que en el transcurso del año recibe mayor precipitación en la cuenca de Tomebamba.

La diferencia entre precipitación y caudal anual para la cuenca de Tomebamba fue de 515 mm, los cuales se perdieron a través de la evapotranspiración, absorción por cultivos, extracción, etc. Mientras que en la cuenca de Yanuncay la perdida fue de 448, 94 mm.

Luego de realizar un promedio del SI para Tomebamba, se obtuvo un índice de estacionalidad de 0,36. Y según la tabla de clasificación de (Walsh & Lawler, 1981), se determina que su régimen de clasificación es que existe propagación de precipitación durante todo el año, pero con una estación lluviosa definida. Para el caso de Yanuncay el SI, es de 0,45 siendo clasificada con un régimen no estacional con una corta estación seca.

El coeficiente de escorrentía para la cuenca de Yanuncay es de 0,45 que nos indica que del total de lluvia que cae en la zona de Yanuncay el 45% de esta se convierte en caudal, y el resto se pierde o es absorbido por el suelo. Mientras que para Tomebamba se registró un coeficiente de escorrentía del 0,49.

4.7.4 Análisis de regulación hídrica

4.7.4.1 Rango de descarga.

Con los percentiles dividimos la serie de datos en 100 grupos de igual valor o en intervalos iguales, es así que eliminamos los valores picos extremos para observar la frecuencia de ocurrencia con mejor claridad.



También con la obtención de valores como quintiles, cuartiles y deciles, se comparó la coincidencia de ciertos valores (por ejemplo el quintil 20 coinciden con el decil 20 o el cuartil 50 coincide con decil 50 y percentil 50), asegurándonos que son cálculos confiables, para ello podemos ver el anexo 9.19.

4.7.4.2 Percentiles.

La alta demanda de caudales y la notable concurrencia por el recurso han hecho que estudios de caudales bajos o mínimos tomen cada vez mayor importancia en relación con la gestión y toma de decisiones del recurso hídrico. A continuación presentamos la tabla 31, con los valores de los percentiles calculados en los caudales específicos de Tomebamba.

Tabla 31. Percentiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba

| | | Percentiles Caudal específico (lt/s/km ²) | | | | | | | |
|------|--------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | P5 | P10 | P15 | P25 | P50 | P75 | P90 | P95 |
| Mín. | Máx. | 5% | 10% | 15% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% |
| 0,13 | 151,69 | 0,41 | 0,71 | 1,18 | 2,62 | 8,35 | 19,25 | 38,80 | 52,56 |

Los valores bajos al P(5) presenta un porcentaje del 5% de los caudales específicos más bajos, cuyos valores están entre el valor mínimo 0,13 y 0,41lt/km². Los valores bajos al P(15) presenta un porcentaje del 15% de los caudales específicos más bajos, cuyos valores están entre el valor mínimo 0,13 y 1,19 lt/km². Los valores superiores al P(95) presenta un porcentaje del 95% de los caudales específicos más altos, cuyos valores están entre el valor 52,56 y el valor máximo 151,69 lt/km². Entre el percentil P(5) Y P(95) hay un 90% de caudales específicos que se encuentran entre 0,41 – 52,56 lt/km².

Para la zona de estudio de Yanuncay se realizaron los mismos cálculos obteniendo así, a continuación en la tabla 32, los valores de los percentiles calculados en caudales específicos.

Tabla 32. Percentiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay

| | | Percentiles Caudal específico (lt/s/km ²) | | | | | | | |
|------|-------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | | P5 | P10 | P15 | P25 | P50 | P75 | P90 | P95 |
| Mín. | Máy. | 5% | 10% | 15% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% |
| 2,24 | 70,29 | 2,80 | 3,03 | 3,65 | 4,27 | 8,33 | 15,29 | 26,56 | 33,41 |

Los valores bajos al P(5) presenta un porcentaje del 5% de los caudales específicos más bajos, cuyos valores están entre el valor mínimo 2,24 y 2,80 lt/km². Los valores bajos al P(15) presenta un porcentaje del 15% de los caudales específicos más bajos, cuyos valores están entre el valor mínimo 2,24 y 3,65 lt/km². Los valores superiores al P(95) presenta un porcentaje del 95% de los caudales específicos más altos. Cuyos valores están entre el valor 33,41 y el valor máximo 70,29 lt/km². Entre el percentil P(5) Y P(95) hay un 90% de caudales específicos que se encuentran entre 2,80 – 70,29 lt/km².

Observando los valores obtenidos en las tablas 31 y 32 se realizaron las siguientes comparaciones.

Para la zona de estudio Tomebamba presenta una variación baja, ya que va desde el valor mínimo de 0,13 lt/km², hasta valor P(5) de 0,41 lt/km², (Diferencia de 0,28 lt/km²). Y para Yanuncay presenta una variación baja también, ya que va desde el valor mínimo de 2,24 lt/km², hasta valor P(5) de 2,80 lt/km², (Diferencia de 0,56 lt/km²).

Para la zona de estudio Tomebamba presenta una variación sumamente alta ya que el 95% de las observaciones obtenidas en los caudales específicos va desde los 52,56 lt/km², hasta valor máximo que tiene 151,69 lt/km², (Diferencia de 99,13 lt/km²). Y para Yanuncay presenta una variación sumamente alta ya que el 95%, de las observaciones obtenidas en los caudales específicos va desde los 33,41 lt/km², hasta valor máximo que tiene 70,29 lt/km², (Diferencia de 36,88 lt/km²).

Según el estudio de “Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos” (Andrade & Ríos, 2014) indica que los caudales mínimos altos tienen una buena capacidad de regulación hídrica en épocas secas y viceversa, por lo que observando los resultados obtenidos (tablas 31 y 32), establecemos que la cuenca que tiene mayores caudales específicos mínimos es la zona de estudio de Yanuncay, por lo tanto esta cuenca es la que regula mejor.

A continuación presentamos la tabla 33, donde comparamos los valores mínimos y máximos en los caudales específicos de las dos cuencas que nos servirá para determinar que cuenca regula mejor.

Tabla 33. Comparación de valores máximos-mínimos, P(5)-P(95), de las dos cuencas de estudio.

| | Caudal específico (lt/s/km ²) | | | | | |
|------------------|---|------|------------|-------|--------|------------|
| | Mín. | P5 | Diferencia | P95 | Máx. | Diferencia |
| Tomebamba | 0,13 | 0,41 | 0,28 | 52,56 | 151,69 | 99,13 |
| Yanuncay | 2,24 | 2,80 | 0,56 | 33,41 | 70,29 | 36,88 |

Así, se determinó que en la cuenca Tomebamba existe una variación sumamente alta en sus valores de caudales específicos a comparación de Yanuncay cuyas características demuestran que tiene caudales mucho más estables, por lo que ésta cuenca regula mejor.

4.7.5 Índice de caudal Base (Baseflow Index, BFI) calculado mediante WETSPRO

Se realizó la separación de flujos con el modelo WETSPRO (Willems, 2004), se obtuvieron los valores que se presenta en la tabla 34.

Tabla 34. Valores de la constante de recesión k caudal base, sub-superficial y superficial.

| | Tomebamba | Yanuncay |
|--|------------------|-----------------|
| Constante de recesión k caudal base (días) | 4,3 | 8 |
| % Caudal Base | 63 | 65 |
| % Caudal Sub-superficial | 20 | 20 |
| % Caudal Superficial | 17 | 14 |

A pesar que el porcentaje de días que hubo precipitación en Tomebamba es mayor que Yanuncay, como se determinó en la tabla 34 se observa que Yanuncay retiene agua por 8 días, mientras que Tomebamba lo hace por 4 días.

A continuación presentamos en la figura 18, la separación de flujos de las dos zonas de estudio.

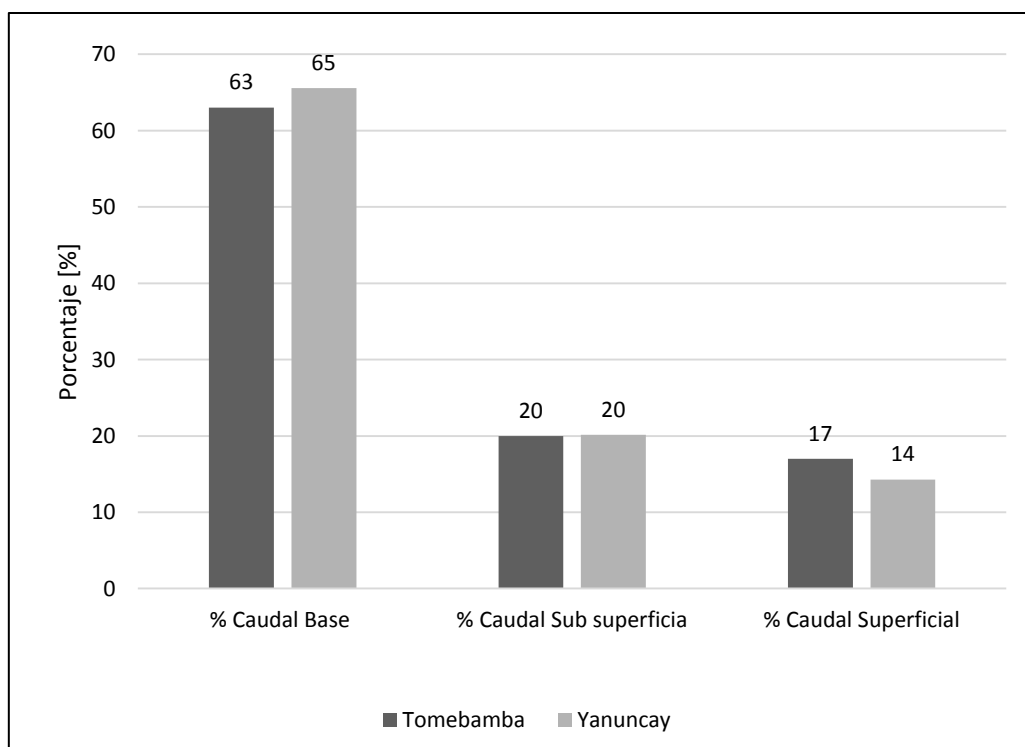


Figura 18. Porcentajes correspondientes a la separación de flujos

Los gráficos dados por el modelo WETSPRO (Willems, 2004), se presentan en las figuras 19 y 20.

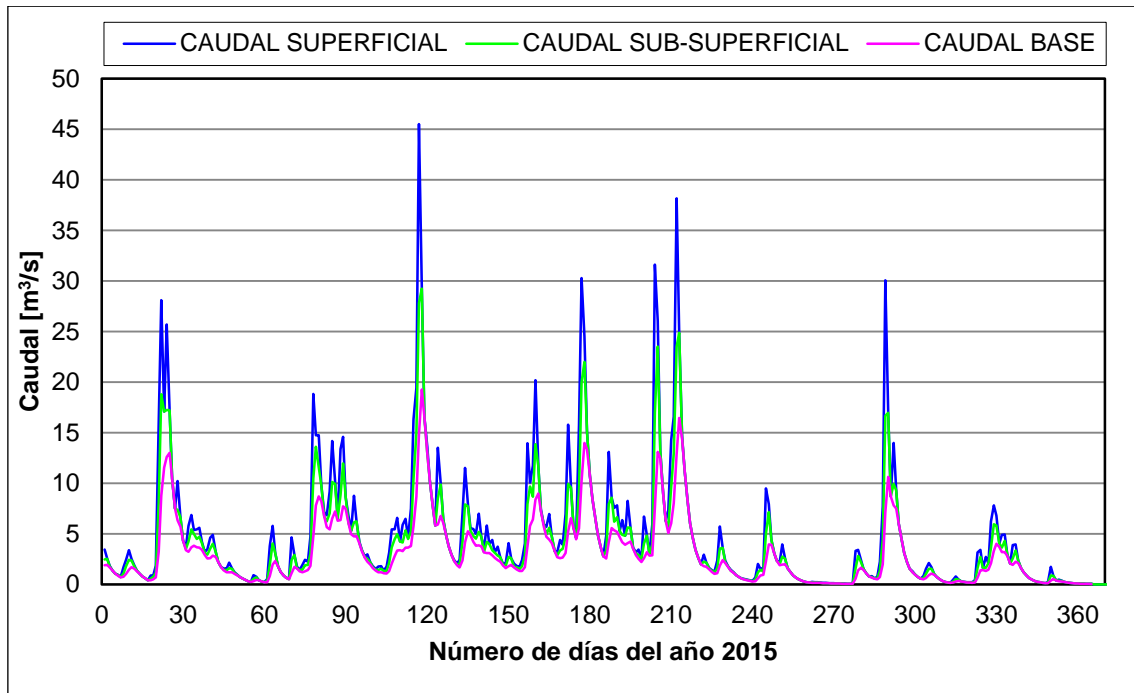


Figura 19. Separación de flujos de Tomebamba

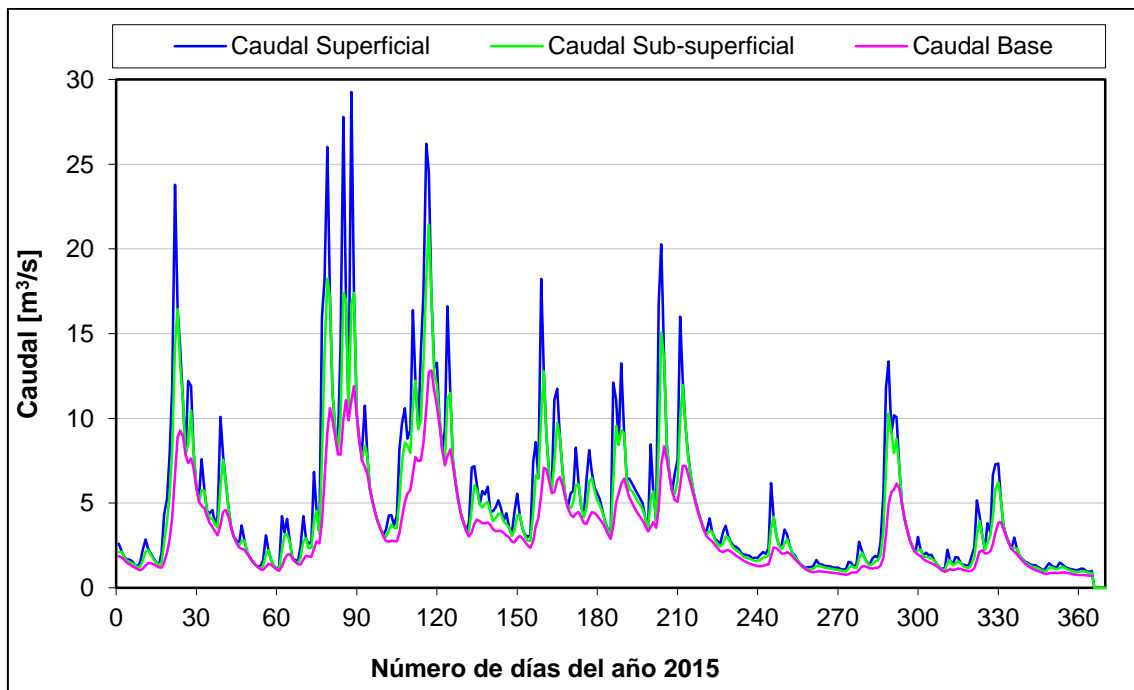


Figura 20. Separación de flujos de Yanuncay

4.7.6 Tiempo de Respuesta (LAG)

Se analizó el evento extremo del 21 de abril de 2015, que provocó el desbordamiento del río Yanuncay, ocasionando daños en las zonas altas de la ciudad de Cuenca, este evento se presentó mediante el Hidrograma (Precipitación y Caudal Vs. Tiempo).

El evento se realizó con la estación limnimétrica de Yanuncay A.J. Tarqui y con las estaciones pluviométricas de Huizhil Soldados PTAR, Yanuncay en Pucán, Izhcayrrumi, porque ese día estas estaciones tenían registros de datos completos a una resolución de 5 minutos. Como se aprecia en la siguiente figura 21 se observa el comportamiento del evento ocurrido el 21 de abril de 2015 en la zona de Yanuncay.

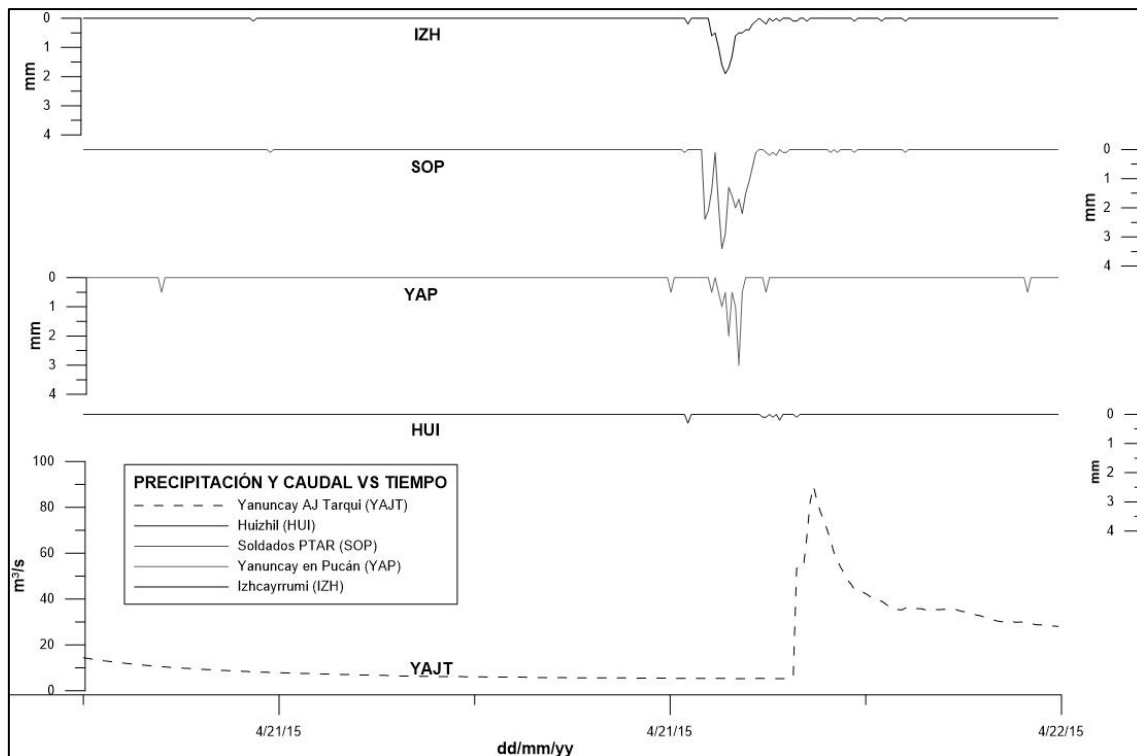


Figura 21. Comportamiento del evento extremo en la cuenca de Yanuncay (21/04/2015)

La precipitación máxima registrada fue de 3,4 mm en la estación de Soldados en PTAR y cuyo evento duro 2 horas; el mismo evento tuvo una duración de 2h30min en la zona de la estación de Izhicayrrumi, 1h20min en Yanuncay en Pucán y tan solo 10 minutos en Huizhil, por lo que se pudo observar que la



lluvia que provocó este evento se dio con mayor intensidad y prolongación en la zona alta de la cuenca.

El caudal máximo registrado que provocó el desbordamiento fue de 89,11 m³/s, según la noticia del diario, El Comercio del día 20 de junio de 2016 (E.M., 2016), menciona que se emitió una prealerta de desbordamiento del río Yanuncay con un caudal de 77,3 m³/s por lo que valores cercanos a 80 m³/s pueden provocar desbordamiento.

En la siguiente tabla 35, se puede observar de manera resumida la distancia y el tiempo transcurrido del evento para la cuenca Yanuncay.

Tabla 35. Yanuncay en la fecha 21/04/2015.

| Código | Distancia km de (YAJT) con cada pluviómetro | Altura (m s.n.m.) | LAG (min) |
|---------------|--|------------------------------|----------------------|
| HUI | 7,14 | 2773 | 50 |
| YAP | 18,79 | 3000 | 110 |
| SOP | 25,12 | 3269 | 135 |
| IZH | 28,44 | 3748 | 130 |

Zona de estudio Yanuncay: HUI, Huizhil; YAP, Yanuncay en Pucán; SOP, Soldados PTAR; IZH, Izhcayrrumi.

Para la cuenca Tomebamba se analizó el evento extremo en día 26/04/2015, con la estación limnimétrica de Matadero Sayausí (MATS), con las estaciones pluviométricas de Patoquinoas, Mamamag Camping, Sayausí PTAP, porque ese día estas estaciones tenían registros de datos completos a una resolución de 5 minutos. Donde el caudal máximo registrado fue de 95,78 m³/s y no hubo ningún desbordamiento. Sin embargo, en el estudio de “Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011” (Vallejo, 2014), determina que caudales superiores a los 154,68 m³/s despiertan una alerta de desbordamiento, por lo que corroboramos que no hubo afectaciones en el año 2015 en la ciudad de cuenca por parte del río Tomebamba.

Como se aprecia en la siguiente figura 22, se observa el comportamiento del evento ocurrido el 26 de abril de 2015 en la zona de Tomebamba.

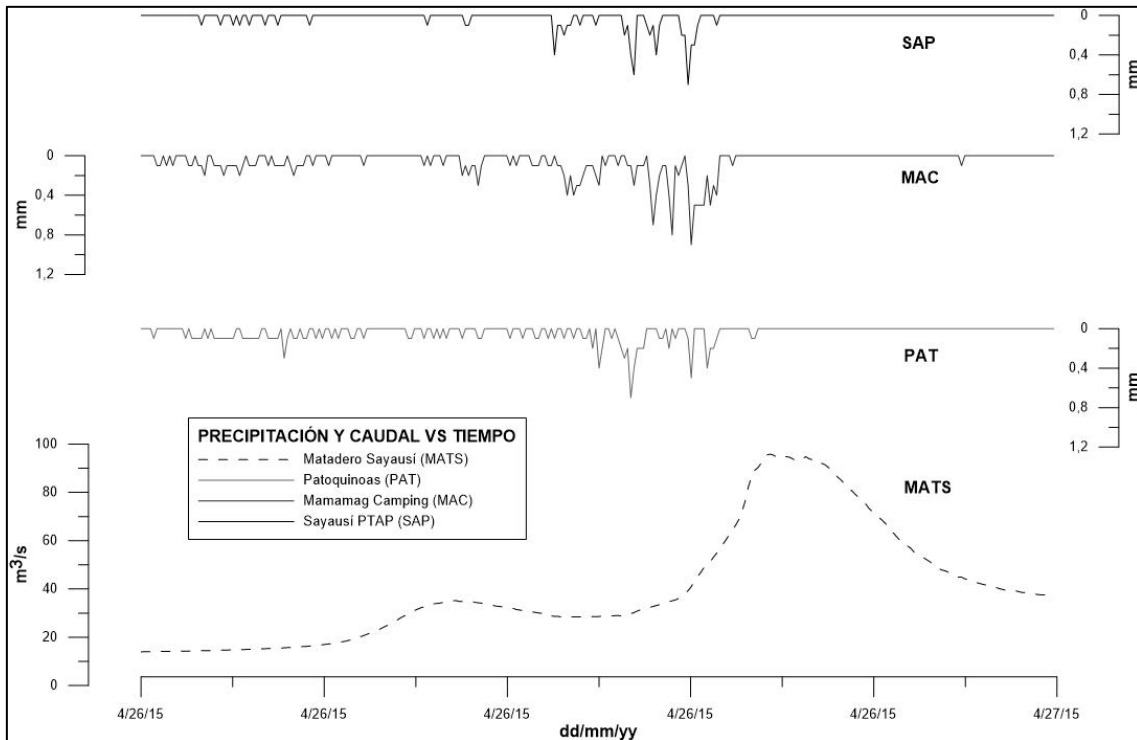


Figura 22. Comportamiento del evento extremo en la cuenca de Tomebamba (26/04/2015)

El evento duró 6h5min en la estación de Patoquinoas, 5h30min en Mamamag Camping y 25 minutos en Sayausí PTAP.

En la siguiente tabla 36, se puede observar de manera resumida la distancia y el tiempo transcurrido del evento para la cuenca Tomebamba.

Tabla 36. Tomebamba en la fecha 26/04/2015

| Código | Distancia km de (MAST) con cada pluviómetro | Altura m s.n.m. | LAG (min) |
|---------------|--|----------------------------|----------------------|
| PAT | 16,19 | 3795 | 220 |
| MAC | 17,26 | 3592 | 185 |
| SAP | 2,15 | 2847 | 130 |

Zona de estudio Tomebamba: PAT, Patoquinoas; MAC, Mamamag Camping; SAP, Sayausí PTAP; MAS, Matadero Sayausí.

4.7.7 Curva de duración de descarga (FDC)

Se elaboró la curva de excedencia (figura 23) con los datos medios diarios para las estaciones limnimétricas de Matadero Sayausí (Tomebamba) y Yanuncay AJ Tarqui (Yanuncay), se ordenaron de acuerdo a su magnitud y luego se calcula el porcentaje de tiempo durante el cual ellos fueron igualados o excedidos.

A continuación se describe la figura 23 donde se observa las curvas de duración de las dos cuencas analizadas.

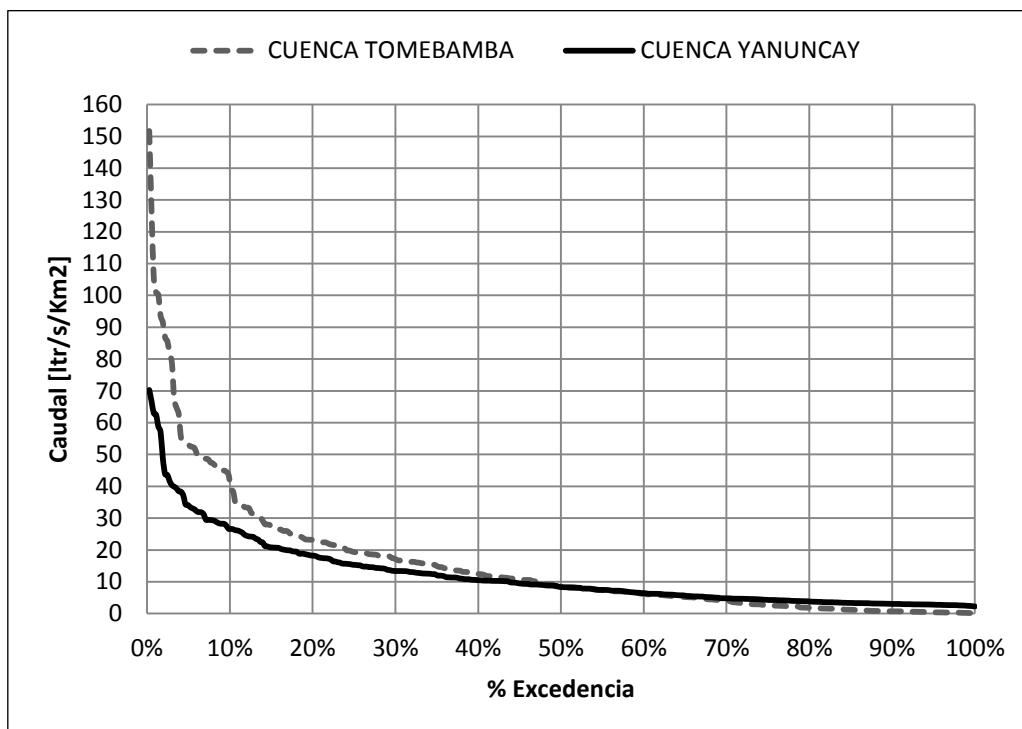


Figura 23. Curvas de duración caudal

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 (E. Martínez, 2015). La cuenca de Yanuncay presenta características más estables de escurrimiento, la cuenca de Tomebamba produce un escurrimiento mucho más



considerable que Yanuncay, y con un almacenamiento o cuidado más adecuado proporcionará un rendimiento mucho más alto.

Sin embargo, las exigencias exactas de almacenamiento dependen de la secuencia efectiva del escurrimiento y no puede estimarse con precisión con las curvas de duración (Chereque, 1989).

4.7.8 Curva de Intensidad - duración de precipitación

Se empleó para la cuenca de Tomebamba 3 estaciones pluviométricas (Matadero Sayausí, Mamamag Camping, Sayausí PTAP) con registros de datos completos igualmente a una resolución de 5 minutos.

Las intensidades van desde 46,8 mm/hr, hasta los 108 mm/hr en 5 minutos, la intensidad máxima encontrada fue en la estación Matadero Sayausí, esto se debe a un evento extremo encontrado el día 26/04/2016 a las 14:25 de un pico de 1,2 mm/hr; siendo la mayor precipitación que de las otras dos estaciones analizadas.

También determinamos las intensidades máximas cada 30 minutos, donde las estaciones de Sayausí PTAP (43,6 mm/hr) y Matadero Sayausí (43,2 mm/hr); estaciones cercanas a 2,15 km de distancia y a un desnivel de altura 154 m. aún siguen presentando valores mayores a Mamamag Camping (25,6 mm/hr), cuya cota está en la cuenca media, en este caso demuestra que la intensidad máxima precipita más en la cuenca baja. Y a partir de las intensidades máximas en un tiempo de 60 minutos los valores de las tres estaciones están por debajo de los 28,2 mm/hr.

Como se observa en la figura 24 se elaboró la curva de intensidad-duración de tres estaciones, la razón de selección fue por su ubicación, Mamamag Camping se encuentra en la cuenca media (3592 m s.n.m.) y Sayausí PTAP (2847 m s.n.m.) - Matadero Sayausí (2693 m s.n.m.), están ubicadas en la cuenca baja.

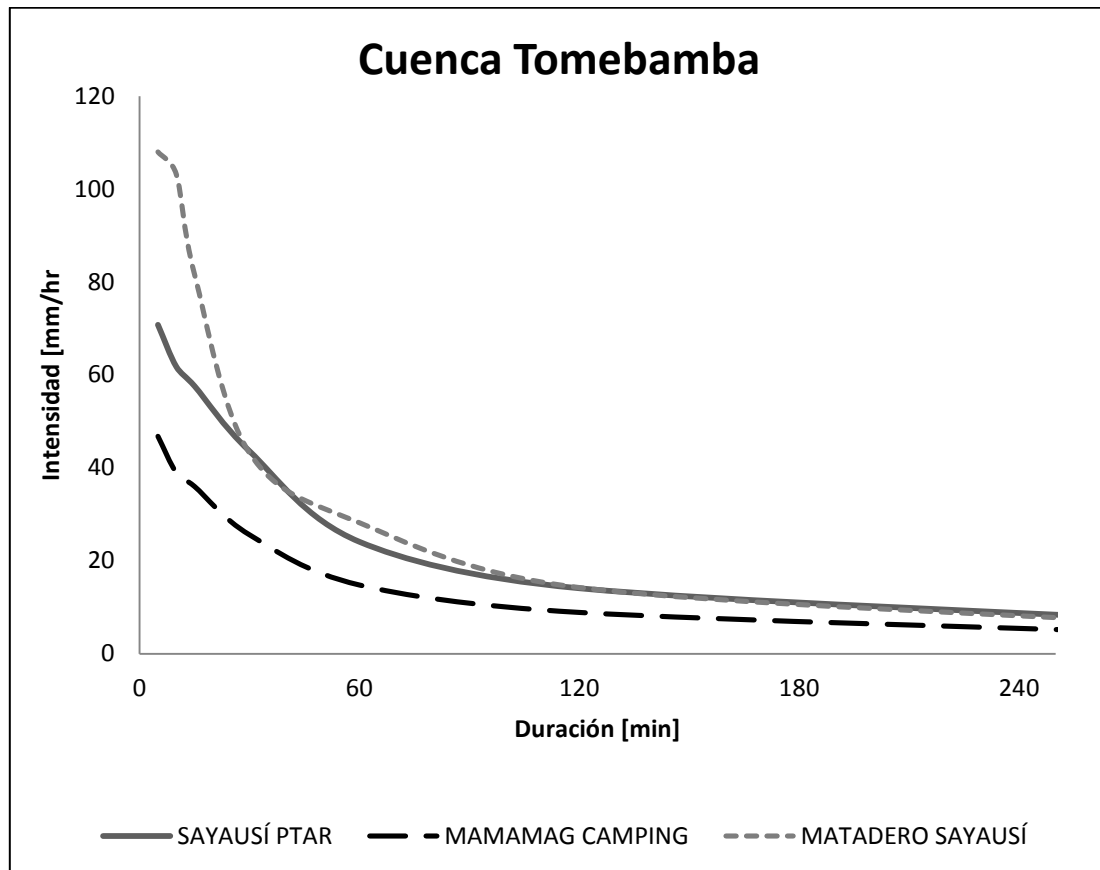


Figura 24. Curva de Intensidad - duración de precipitación Tomebamba

Para graficar la curva de intensidad-duración se necesita por lo menos un año de datos completos cada 5 minutos, por lo que en nuestro estudio si contamos con esos datos. Para la cuenca de Yanuncay contamos con las estaciones pluviométricas de Izhcayrrumi y Soldados, ubicados en la cuenca media.

En la figura 25 se presentan intensidades desde 38,4 mm/hr hasta 48 mm/hr en 5 minutos, estas intensidades generan escorrentía. Los valores encontrados son similares debido a la cercanía que existente entre las dos estaciones (4,38 km de distancia), solo tenemos un variación visible a los 15 min de intensidad, pues Izhicayrrumi presenta valores de 30,8 mm/hr, mientras que Soldados PTAR a la misma escala tiene valores de 37,6 mm/hr.

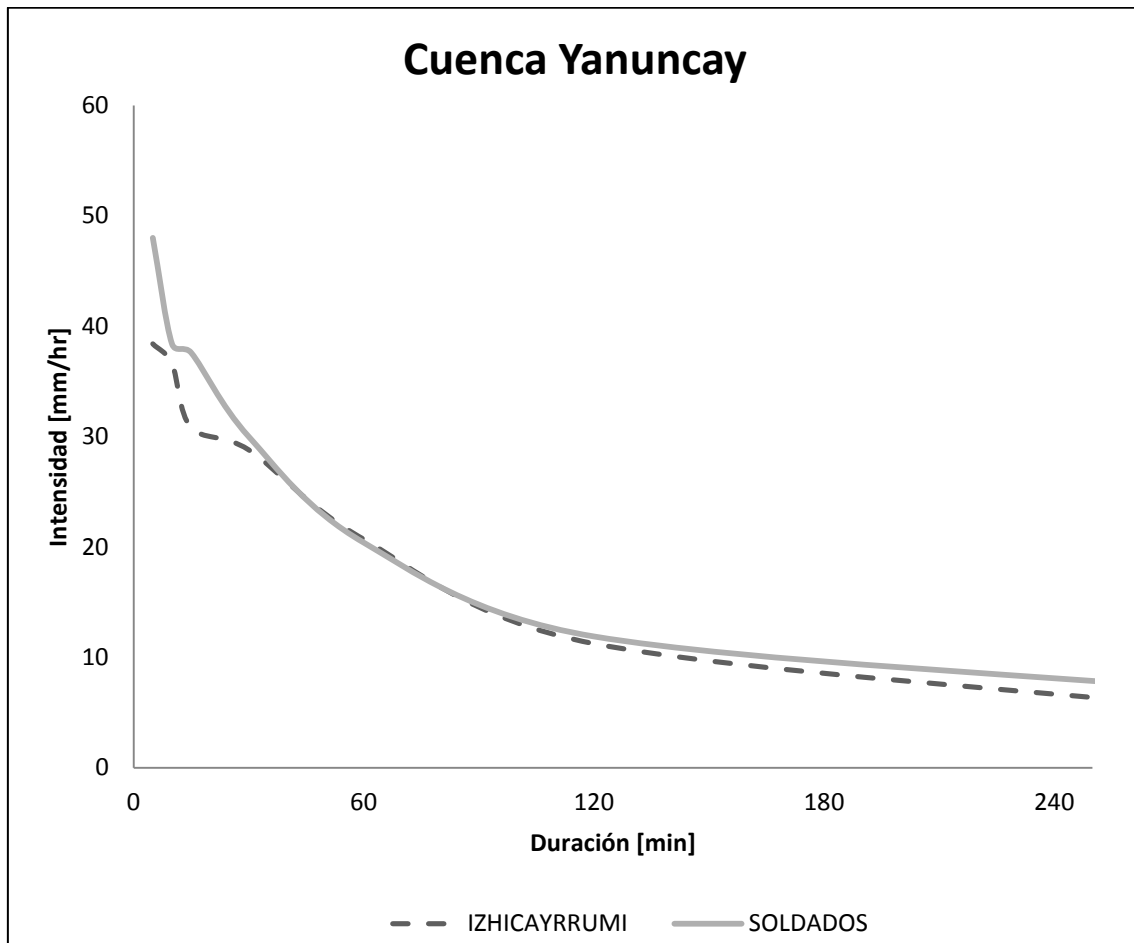


Figura 25. Curva de Intensidad - duración de precipitación Yanuncay

Este análisis denota que las intensidades máximas de la cuenca media y la cuenca baja pueden variar significativamente, y que se debe considerar este análisis a la hora de realizar estudios de precipitación (Morán, 2003).

A continuación en la figura 25, se observa dos curvas promediadas entre las estaciones de cada cuenca para así comparar las diferentes zonas de estudio.

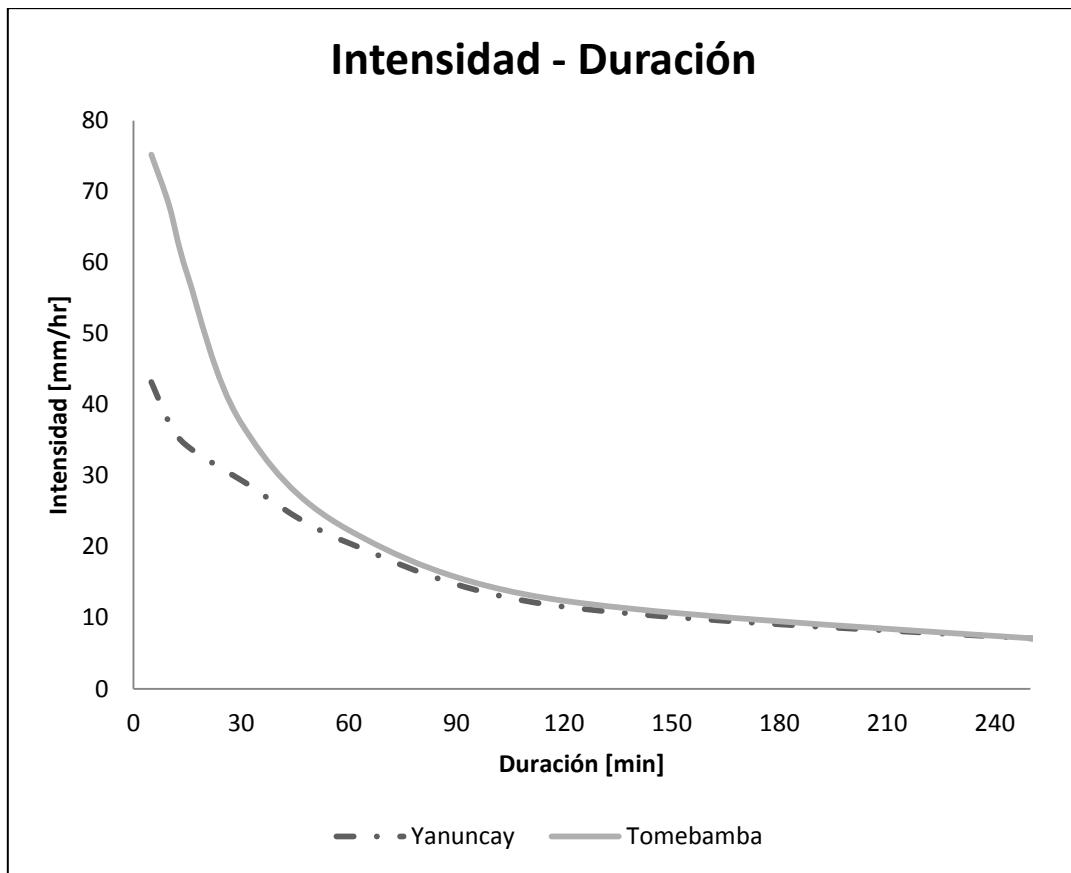


Figura 26. Curva de Intensidad - duración de precipitación Yanuncay y Tomebamba

Al comparar los promedios de intensidades como se puede apreciar en la tabla 37, en las dos zonas de estudio existe una mayor diferencia entre intensidades que van desde los 43,20 mm/hr (Yanuncay) hasta los 75,20 mm/hr (Tomebamba) en 5 min y al analizar a los 30 minutos las intensidades siguen siendo significativas pues los valores varían desde los 29,40 mm/hr hasta los 37,47 mm/hr.

Tabla 37. Valores promedios de las intensidades máximas analizadas en las cuencas de estudio.

| PROMEDIOS | | |
|-----------|----------|-----------|
| Minutos | Yanuncay | Tomebamba |
| 5 | 43,20 | 75,20 |
| 10 | 37,50 | 68,00 |
| 15 | 34,20 | 58,40 |
| 30 | 29,40 | 37,47 |
| 60 | 20,55 | 22,37 |
| 120 | 11,58 | 12,42 |
| 300 | 5,66 | 5,38 |

4.8 Uso de suelo y cobertura vegetal

Primero se determinó una diferencia en las áreas de las cuencas, ya que este es un punto importante a la hora de comparar estas cuencas. Para un mejor entendimiento hemos realizado mapas de uso de suelo y de la cobertura vegetal existente en el año 2015 de las dos cuencas de estudio.

La leyenda elaborada para este estudio pretende dar respuesta a la influencia del funcionamiento hidrológico en las cuencas de estudio en relación al uso de suelo. En tal sentido se han distinguido las clases de uso del suelo y cobertura vegetal existente tal como se muestra en la figura 27.

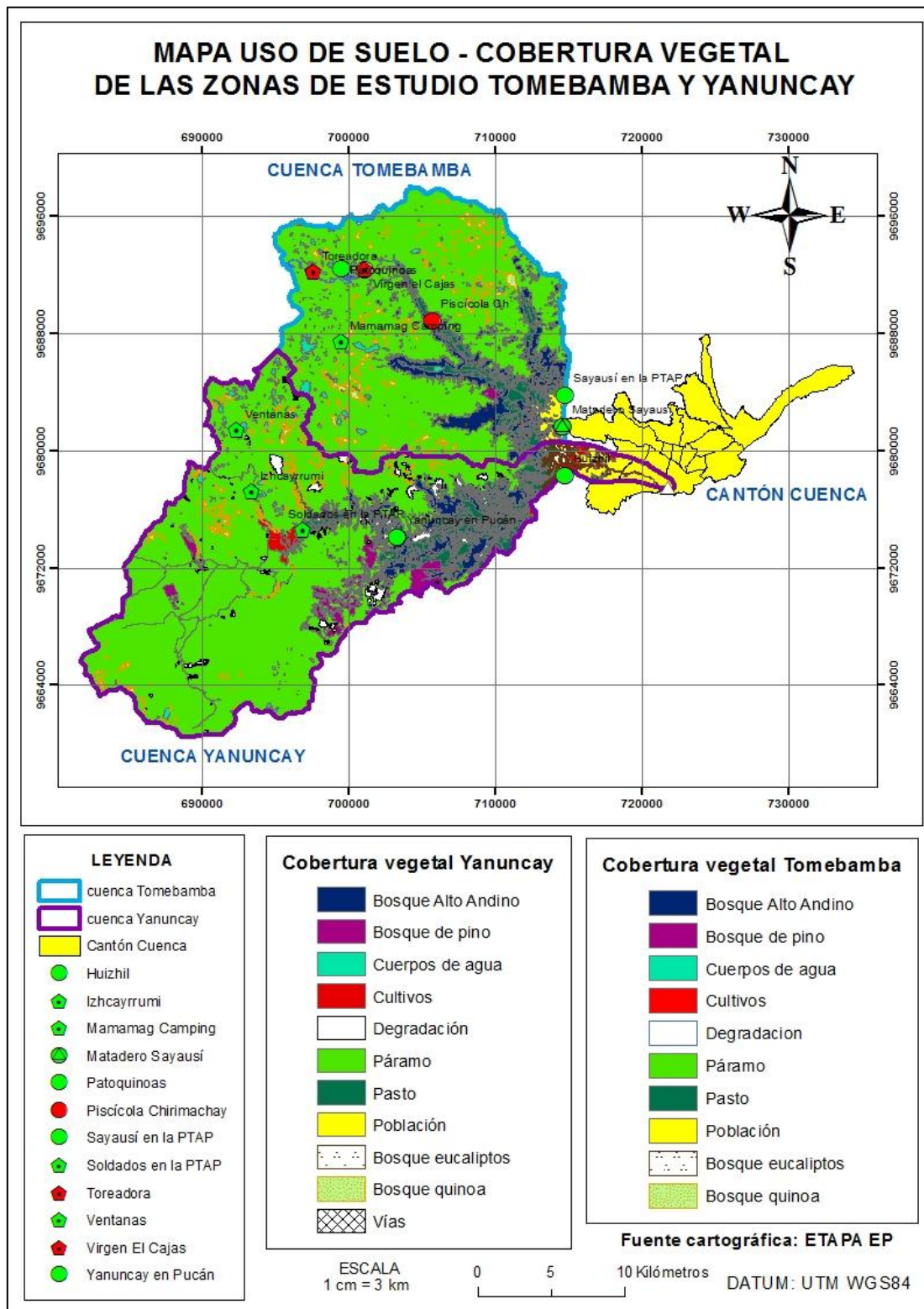


Figura 27. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de las dos cuencas de estudio. Modificación Cartográfica: Autores



La producción hídrica en estas cuencas puede verse afectada por el consumo de la vegetación dominada por pajonal (páramo), según la tabla 38 se observa que para la cuenca Yanuncay (precipita 829,94 mm en el año), tiene una mayor cantidad de recepción de agua porque su área de páramo es mucho mayor que el área de páramo de la cuenca Tomebamba.

La cuenca Tomebamba (precipita 1007,49 mm en el año), tiene también mayor cantidad de vegetación arbustiva como bosque de quínoa especialmente cerca de los cursos de agua, esta cuenca tiene páramo en su parte alta, por supuesto mucho menor que Yanuncay por lo que recibe una menor cantidad de agua, a esto le sumamos el porcentaje de evapotranspiración ya que para la zona de Tomebamba presenta menor evapotranspiración de 51,11%, y la zona de Yanuncay presenta el porcentaje de 54,09% (esto es calculado con la diferencia entre la precipitación y el caudal de descarga).

Para tener una mejor observación se elaboró una ampliación de las zonas de estudio determinando el estado del uso del suelo, cobertura vegetal, del año 2015 en las figuras 28 y 29.

A continuación en la figura 28 se observa un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal registrado en la cuenca Tomebamba durante el año 2015.

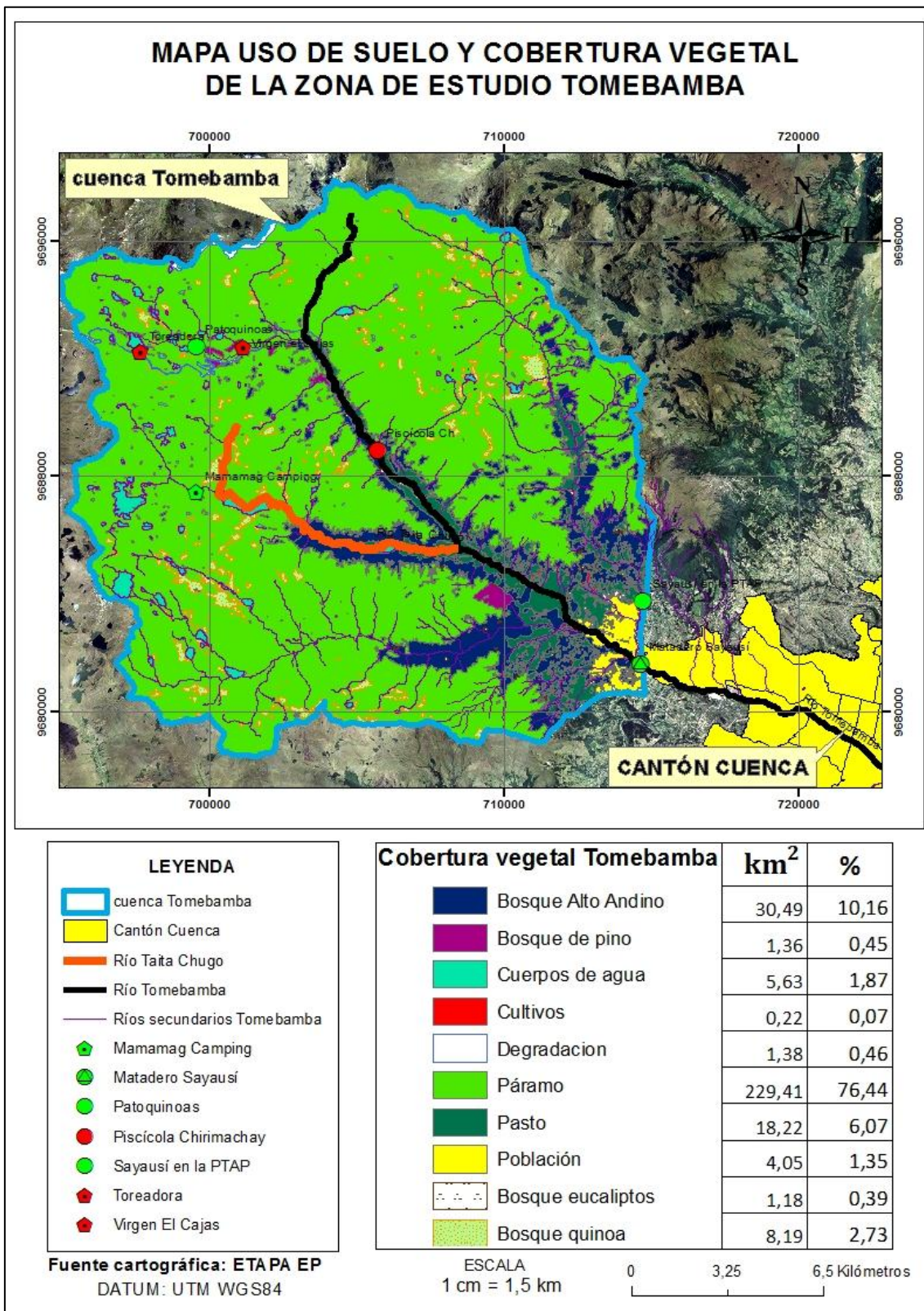


Figura 28. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca Tomebamba
Modificación Cartográfica: Autores

A continuación en la figura 29 se observa un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal registrado en la cuenca Yanuncay durante el año 2015.

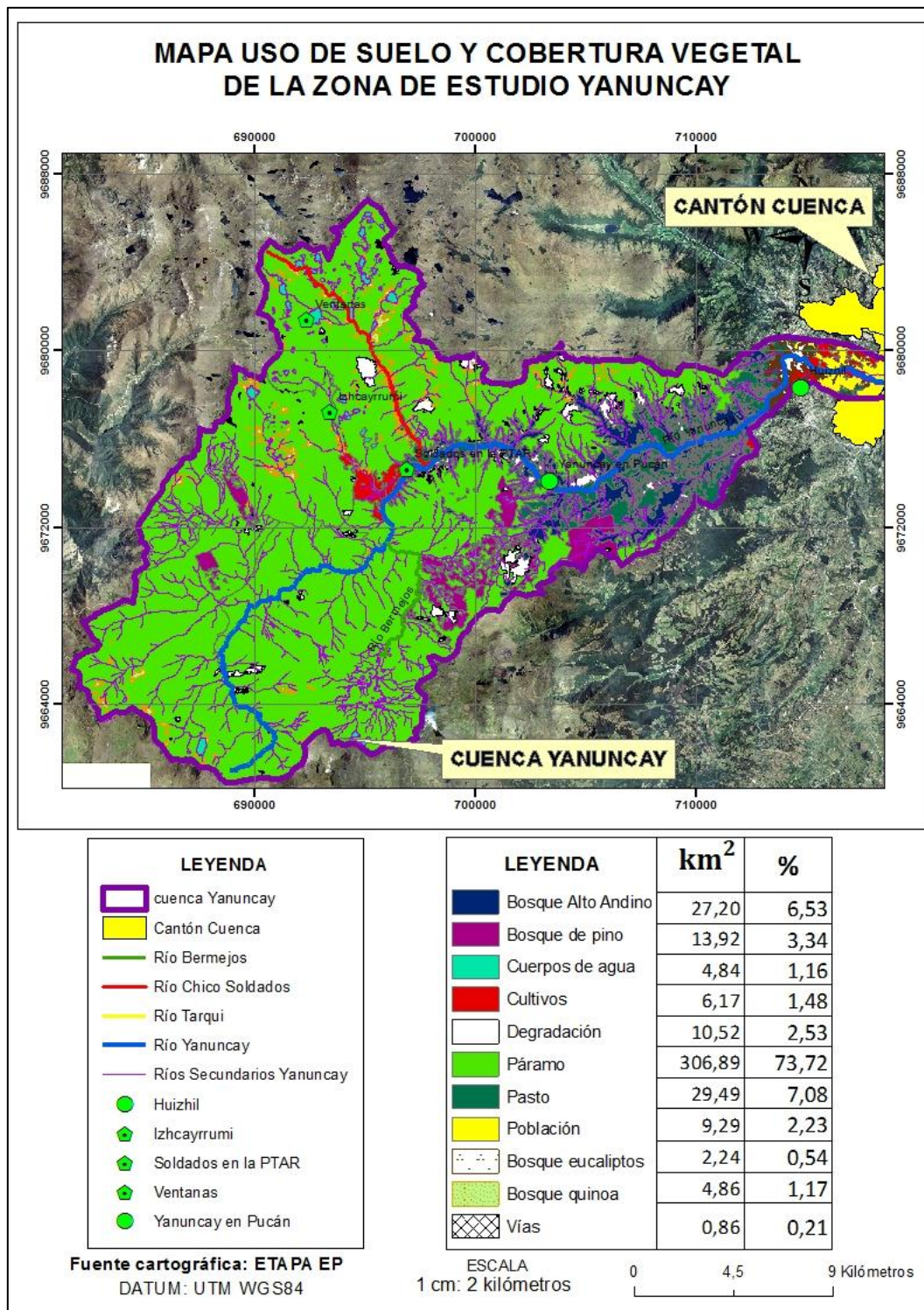


Figura 29. Mapa uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca Yanuncay.
 Modificación Cartográfica: Autores



Para el parámetro de los cultivos y degradación del suelo se comparó sus efectos con el balance hídrico donde el caudal de salida de la cuenca Yanuncay (45,91%) es menor que Tomebamba (48,88%), ya que recibe menos precipitación y mayor evapotranspiración es la razón principal por lo que los caudales de Yanuncay sean menores. Además, de la cuenca del Yanuncay posee porcentajes de áreas cultivadas y degradadas especialmente en la parte baja (mayor población), por lo que su capacidad de regulación hídrica es menor que las partes bajas de la cuenca Tomebamba.

Sin embargo, en la parte alta de Yanuncay que es donde tiene mayor área de páramo puede ser un excelente regulador hídrico con mayor capacidad de almacenamiento, esto también implica un mayor porcentaje de evapotranspiración, por ello tiene un caudal bajo durante todo el año sin manifestar discontinuidades en su flujo, en cambio Tomebamba tiene en su parte alta menor área de páramo, por lo que explica su menor capacidad de almacenamiento y también las discontinuidades en el flujo del caudal durante todo el año, además de que presenta una mayor área de bosque alto andino y bosque de quínoa por lo que tiene menos evapotranspiración.

También se elaboró un mapa (Figura 30) de pendientes media de cada cuenca con los siguientes resultados.

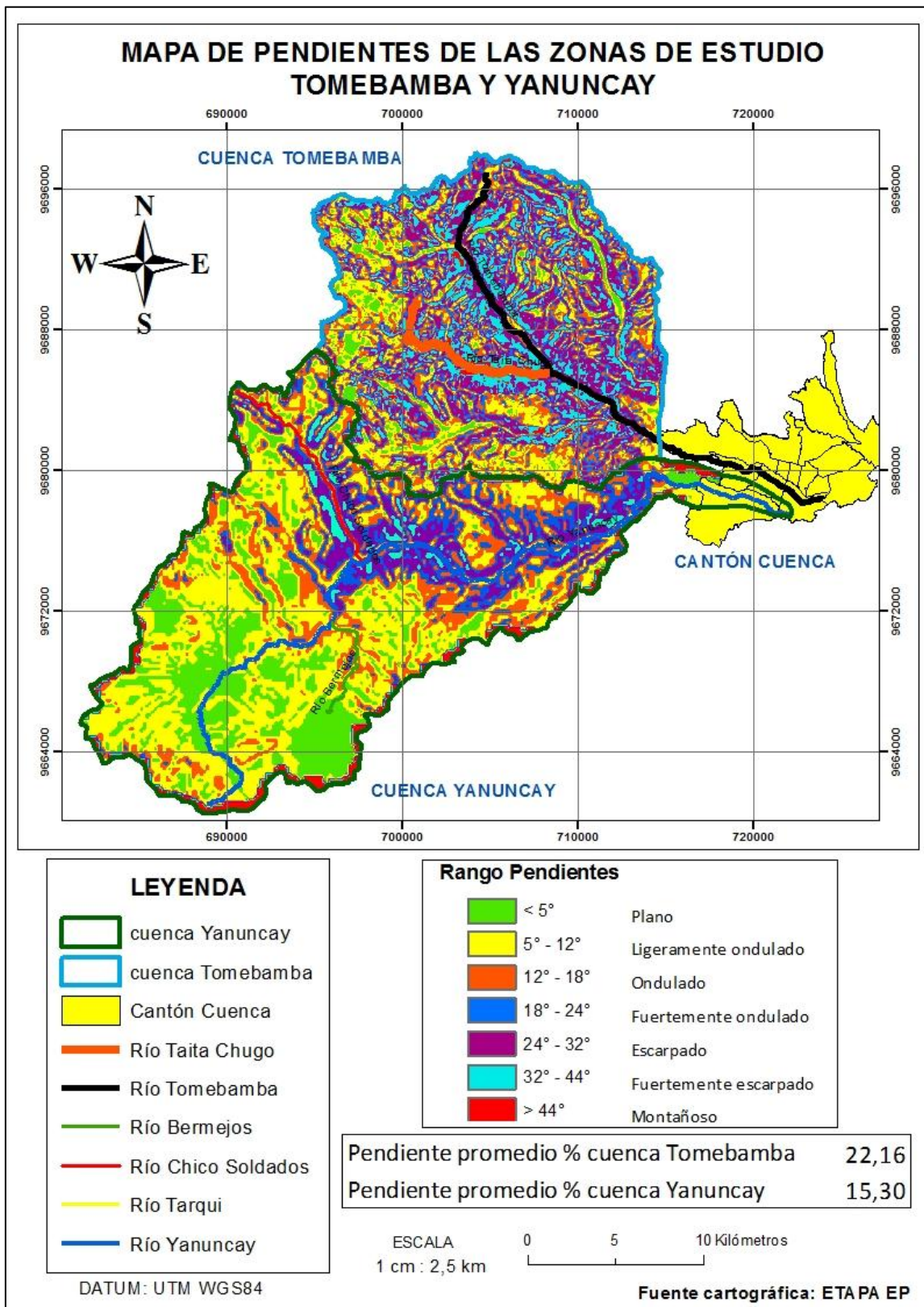


Figura 30. Mapa de pendientes de las dos zonas de estudio.
Modificación Cartográfica: Autores

Según el mapa de la figura 30, se observa que para la cuenca Yanuncay existe una mayor distribución de pendientes entre 5° - 12° que son las de pendientes bajas (plano y ligeramente ondulado), y para la cuenca Tomebamba hay una mayor distribución de pendientes entre 24° - 44° , que son las de pendientes altas (escarpado, fuertemente escarpado y montañoso).

Para la cuenca Tomebamba se obtuvo una pendiente de 22,16% y para Yanuncay de se obtuvo una pendiente 15,30%. Es decir que Tomebamba tiene mayor pendiente con una diferencia de 6,86%.

Se elaboró histogramas de pendientes de cada una de las cuencas con sus respectivos porcentajes como se puede apreciar en las siguientes figuras 31 y 32.

A continuación se presenta el histograma de pendientes de la cuenca Tomebamba (figura 31).

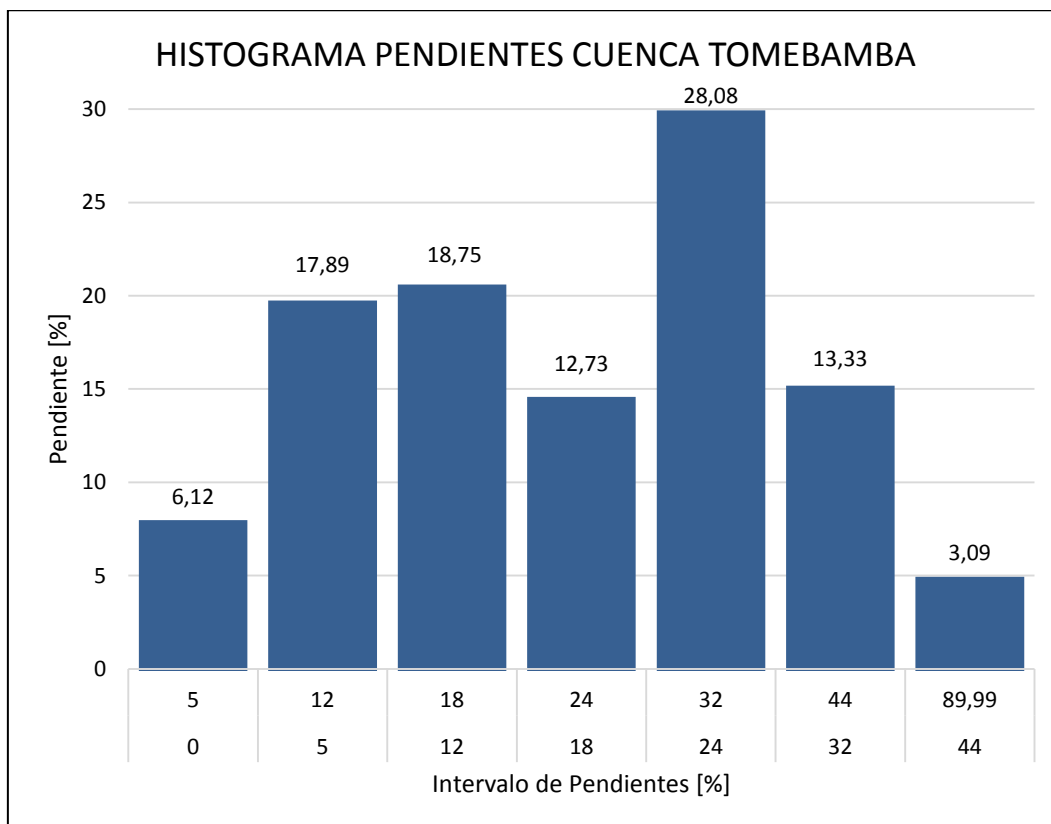


Figura 31. Histograma de pendientes de la cuenca Tomebamba

A continuación se presenta el histograma de pendientes de la cuenca Yanuncay (figura 32).

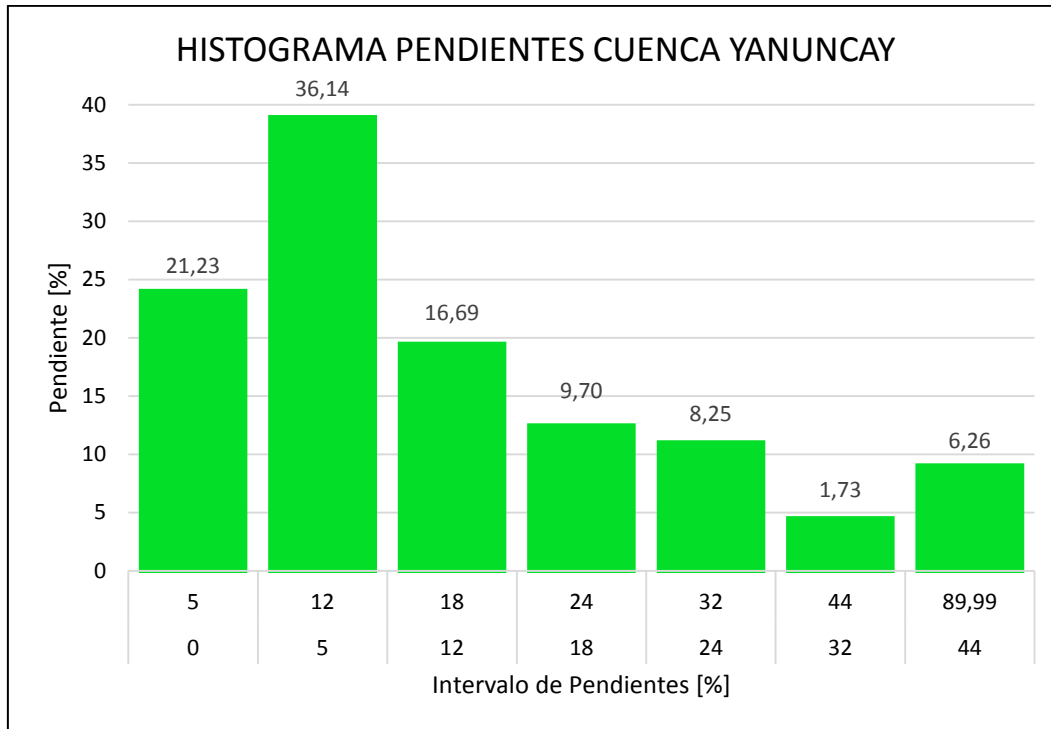


Figura 32. Histograma de pendientes de la cuenca Yanuncay

A continuación en la tabla 38 describimos los parámetros obtenidos en análisis de uso de suelo y cobertura vegetal mediante el software ArcGis 10.4.

Tabla 38. Parámetros de uso de suelo y cobertura vegetal

| PARÁMETROS | cuenca Tomebamba | | cuenca Yanuncay | |
|----------------------|------------------|------------|-----------------|------------|
| | km ² | % | km ² | % |
| Páramo | 229,41 | 76,44 | 306,89 | 73,72 |
| Bosque Alto Andino | 30,49 | 10,16 | 27,20 | 6,53 |
| Pasto | 18,22 | 6,07 | 29,49 | 7,08 |
| Bosque de Quínoa | 8,19 | 2,73 | 4,86 | 1,17 |
| Cuerpos de Agua | 5,63 | 1,87 | 4,84 | 1,16 |
| Población | 4,05 | 1,35 | 9,29 | 2,23 |
| Degradación Suelo | 1,38 | 0,46 | 10,52 | 2,53 |
| Bosque de pino | 1,36 | 0,45 | 13,92 | 3,34 |
| Bosque de eucaliptos | 1,18 | 0,39 | 2,24 | 0,54 |
| Cultivos | 0,22 | 0,07 | 6,17 | 1,48 |
| Vías de acceso | 0,00 | 0,00 | 0,86 | 0,21 |
| total | 300,13 | 100 | 416,27 | 100 |

En la curva de duración general de caudales sirve para explicar los efectos de los impactos del cambio de uso de la tierra sobre la distribución de los caudales de salida sobre las zonas de estudio analizadas (P. Crespo, Célleri, Buytaert, & Bièvre, 2014). En este sentido en la cuenca Tomebamba que tiene mayor precipitación, a pesar de presentar menor área de cultivo en la parte media y baja, se observa una disminución en los caudales bajos y medios y un aumento en los caudales pico, llegamos a determinar una considerable pérdida de la capacidad de regulación de agua, esto se debe principalmente a que en la parte media y baja de la cuenca se encuentra afectada por los impactos humanos como pastoreo, agricultura, compactación del suelo, introducción de árboles no nativos, drenajes artificiales para bajar el nivel freático (Buytaert, Célleri, et al., 2006). Finalmente, la cuenca Tomebamba presenta una afectación mayor sobre su capacidad de regulación hídrica y en menor grado a la cantidad de agua que sale de la misma.



También con la revisión del estudio ambiental (ExPost) del “Sistema de Abastecimiento de Agua Potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento” (Piedra, 2017), describe una evaluación de parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable en el Ecuador, donde se determinaron valores de sedimentos totales, información que usamos para establecer una comparación entre las Plantas de Agua de descarga final El Cebollar que corresponde a la cuenca Tomebamba y a la Planta de Agua de Sustag que corresponde a la cuenca Yanuncay (ver anexo 9.22).

El contenido de Sólidos suspendidos Totales (116 mg/lit) de la descarga de la Planta de Agua El Cebollar es sumamente mayor que el resultado de sólidos suspendidos de la Planta de Agua Sustag (18 mg/lit), llegando ambos ríos al cumplimiento de la normativa en la Planta de Agua de descarga final de las dos zonas de estudio.

El contenido de Sólidos sedimentables (8 mg/lit) de la descarga de la Planta de Agua El Cebollar es sumamente mayor que el resultado de sólidos sedimentables de la Planta de Agua Sustag (<0,5 mg/lit), llegando ambos ríos al cumplimiento de la normativa en la Planta de Agua de descarga final de las dos zonas de estudio.

El contenido de sólidos totales (178 mg/lit) de la descarga de la Planta de Agua El Cebollar es sumamente mayor que el resultado de sólidos totales de la Planta de Agua Sustag (96 mg/lit), llegando ambos ríos al cumplimiento de la normativa en la Planta de Agua en las zonas de estudio.

Un parámetro que llama la atención es también el contenido de Aluminio (8,63 mg/lit) de la descarga de la Planta de Agua El Cebollar es sumamente mayor que el resultado de contenido de Aluminio en la Planta de Agua Sustag (0,66 mg/lit), llegando únicamente al cumplimiento de la normativa para el río Yanuncay en la Planta de Agua – descarga final y un incumplimiento de la normativa el río Tomebamba en la Planta de Agua – descarga final.

Con la finalidad de determinar la turbiedad, según los resultados nos indica que la cuenca Tomebamba presenta mayor producción de sedimentos (Buytaert, Céleri, et al., 2006).



En el estudio de “Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos”(P. Crespo et al., 2014), menciona que la evapotranspiración es mayor en los bosques de pino, debido al mayor consumo en las zonas de las raíces y pérdida por interceptación del dosel, para nuestro caso, **si** es coincidente con esta observación, ya que la evapotranspiración es mayor para la cuenca de Yanuncay, por poseer mayor área de bosques de pino.

5. DISCUSIÓN

Comparación entre cuencas

Para la determinación de los objetivos planteados hemos estudiado las cuencas de los ríos Tomebamba y Yanuncay, situadas en la provincia Azuay, Cantón Cuenca. En cada una de ellas, hemos establecido cual es la disponibilidad de agua, en cuanto a la generación de escorrentía, evapotranspiración, áreas y en función a las características superficiales relacionadas a la vegetación, el suelo y variabilidad en la estacionalidad de la precipitación.

Estas cuencas se encuentran juntas, tienen orientación, cobertura, tipo de suelos, y rango de altitud similares, en donde una recibe una precipitación anual promedio ponderada con polígonos de Thiessen de 1007,49 mm (Tomebamba) y de 829,94 mm (Yanuncay); en el mismo orden la primera cuenca tiene un caudal específico medio anual de 15,62 lt/s/km² (mayor) y la otra 12,08 lt/s/km² (menor), esto fue en el año 2015.

De acuerdo al análisis de los resultados de la presente investigación realizada, a partir de los indicadores hidrológicos como caudales específicos y desde el punto de vista de uso de suelo, la cuenca de Yanuncay tiene mayor área (416,27 km²), a comparación de Tomebamba (300,12 km²). Según la tabla 38 y las figuras 27, 28 y 29, es apreciable el mayor impacto ambiental en la cuenca baja de Yanuncay, ya que esta tiene mayor porcentaje de zonas pobladas, vías de acceso, árboles introducidos, áreas de agricultura, degradación o erosión de suelos, y presentan una leve similitud en porcentajes de cuerpos de agua, pasto y bosques de eucalipto con la cuenca Tomebamba. Se determina que la

cuenca más alterada es Yanuncay en su parte baja, sin dejar de lado que la parte más alterada para la cuenca Tomebamba es en su parte media-baja.

A continuación se presenta la tabla 39 con los valores de los indicadores hidrológicos obtenidos en las dos zonas de estudio.

Tabla 39. Indicadores hidrológicos de regulación y disponibilidad del recurso agua.

| | Indicadores hidrológicos | Unidad | Tomebamba | Yanuncay |
|---|---|----------------------|------------------|-----------------|
| Disponibilidad | Precipitación anual | Mm | 1007,49 | 829,94 |
| | Caudal o volumen medio anual. | lt/s/km ² | 0,13 | 2,24 |
| | Diferencia entre precipitación y caudal anual. | Mm | 515 | 448,91 |
| | Índice de Estacionalidad (SI) Promedio de la cuenca | - | 0,36 | 0,45 |
| | Coeficiente de escorrentía. | - | 0,49 | 0,45 |
| | Regulación | Rango de Descarga | - | 0,32 |
| Percentil 5 | | lt/s/km ² | 0,41 | 2,80 |
| Percentil 50 | | lt/s/km ² | 8,35 | 8,33 |
| Percentil 90 | | lt/s/km ² | 38,81 | 26,56 |
| Índice de caudal Base (Baseflow Index, BFI) | | % | 63 | 65 |

De acuerdo al análisis de los resultados de la presente investigación realizada en los diferentes indicadores hidrológicos tabla 39, la cuenca de Yanuncay recibe menor precipitación promedio anual que Tomebamba, y su pérdida de agua por evapotranspiración es menor, tiene una mejor regulación, mayor estabilidad en los caudales, y una mayor capacidad de almacenamiento, esto demuestra una alta capacidad de amortiguamiento a los eventos extremos de precipitación y regulación de caudales en épocas de verano, a comparación de Tomebamba que muestra una baja capacidad de amortiguamiento a eventos extremos con baja regulación de caudales en época de verano llegando incluso a valores cercanos a los 0m³/s en ciertos días del año. Debido a los valores del



índice de caudal base, que se refiere a la regulación del ciclo hidrológico, esta cuenca Tomebamba en comparación a Yanuncay tiene menor tiempo de almacenamiento de caudal base (63 días), igual caudal sub-superficial (20 días) y mayor caudal superficial (17 días), esto es preciso mencionar, ya que es un ecosistema que almacena agua durante períodos húmedos y los libera en períodos secos. En los páramos, también el agua se almacena en acuíferos y en la vegetación, aparte del suelo, esto se explica debido a la alta capacidad de almacenamiento en la cuenca Yanuncay (Llambí, Célleri, Bièvre, Ochoa, & Borja, 2012).

En la cuenca de Yanuncay se da una mejor regulación hídrica, debido a que tiene mayor área de páramos sin degradación en su parte alta y de acuerdo al indicador de regulación hídrica realizado en el software WETSPRO, el tiempo de almacenamiento de caudal base es de 66 días, caudal sub-superficial de 20 días y menor caudal superficial 14 días, gracias a esto se obtiene una mayor absorción del agua y durante épocas en las que se presentan caudales bajos o estación seca, ayuda a abastecer de este recurso en las zonas cercanas a la cuenca.

La regulación hídrica de las cuencas a través de los caudales específicos mínimos en la tabla 33, se observa el valor de éste caudal en la cuenca de Tomebamba, siendo menor a Yanuncay. Como se menciona en el estudio “Hidrología del páramo Importancia, propiedades y vulnerabilidad. Conocer para Conservar.” (Bièvre et al., 2014), que los ríos que descienden desde los páramos con una elevada capacidad de regulación del agua tienen un flujo base sostenido.

De los resultados obtenidos se establece una vez más la importancia de preservar el páramo, pues se da el mayor crédito de la alta regulación de agua a los suelos de este ecosistema (Medina & Patricio, 2001). La estructura del suelo muy ligera y porosa y la extraordinaria capacidad de almacenamiento de agua, confirman la habilidad del suelo para una buena regulación de agua (De Bièvre, 2016).



Al buscar información que respalden a la ocurrencia de un evento de desbordamiento en el año 2015 se encontró que en la cuenca de Yanuncay solo se registró un evento extremo, que provocó el desbordamiento y su posterior inundación de las zonas altas de la ciudad de Cuenca, el mismo que sucedió el 21 de abril. Los valores de caudal cercanos a $80 \text{ m}^3/\text{s}$ provocaron desbordamiento y activación de alerta para inundaciones. En el caso de Tomebamba en el mismo año no se registraron desbordamientos, a pesar de ello, el caudal más alto registrado fue de $95,78 \text{ m}^3/\text{s}$.

Comparando la curva de duración de la figura 23 de las dos cuencas se observa que presentan una forma de la curva similar; sin embargo, Tomebamba tiene los caudales específicos más altos.

Los caudales específicos altos dependen del exceso de infiltración, de la cantidad de precipitación y por exceso de saturación, es decir que el suelo ya no puede infiltrar más porque se ha saturado al 100% (Buytaert, Iñiguez, et al., 2006).

La curva de intensidad – duración de la figura 24, muestra que en la zona de Tomebamba a una escala de 5 min existe mayor intensidad de lluvia en la parte baja de la cuenca, que en las otras zonas y a partir de una escala de 30 minutos las intensidades máximas de las dos zonas de estudio empiezan a ser similares.

6. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objeto realizar un análisis del comportamiento hidrológico y estado actual del recurso hídrico en las cuencas del río Tomebamba y Yanuncay durante el año 2015. Para entender mejor la descripción de los diferentes impactos ambientales en las zonas de estudio fueron analizados 12 indicadores hidrológicos, esto nos sirvió para estimar la regulación hídrica de las cuencas a partir del balance hídrico e identificando similitudes y diferencias en la respuesta hidrológica de las dos cuencas. Las mismas que por su cercanía tuvieron similares condiciones climatológicas, geológicas y topográficas.



Dada la importancia de cuidado del recurso agua, proveniente de los páramos, y la fragilidad de éstos en cuanto a los suelos, el presente estudio aportó con conocimientos importantes en cuanto al comportamiento hidrológico vs., uso de suelo, que al cambiar la cobertura del suelo (impactos ambientales directos e indirectos) se presentan cambios en las variables descritas anteriormente como la precipitación, caudales, evapotranspiración de las cuencas, ya sea por los cultivos, introducción de plantas nativas y no nativas como el pino, eucalipto, degradación del suelo por pastoreo o quemas, dan como resultado una importante disminución en la producción de agua y en la capacidad de regulación hídrica de las cuencas. Por ello, para proteger los recursos hídricos de los ecosistemas andinos (páramo de las cuencas Tomebamba y Yanuncay), se deben controlar y regular los cambios en el uso de los suelos.

El índice de estacionalidad obtenido con datos correspondientes al año 2015, comparado con el estudio realizado con datos del año 2014 “Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio una gradiente altitudinal” (Tapia, 2016), nos permitió comparar los regímenes de precipitación a lo largo de la gradiente altitudinal en la zona del Tomebamba y Yanuncay, los cuales tienen que ser comparados con muchos años más para que estos datos sean considerados como líneas base para futuros estudios de hidrología y desarrollo de prácticas para prevención, conservación y mitigación ambiental.

Mediante el análisis del efecto de la densidad de estaciones sobre el balance hídrico es provechoso obtener información de datos meteorológicos, con las estaciones de Toreadora (TOR), Virgen El Cajas (VEC), Piscícola Chirimachay (PIC), Mamamag Camping, Matadero Sayausí (MAT), las estaciones de Patoquinoas (PAT) y Sayausí en la PTAP (SAP), pueden ser movidas a otro lugar, ya que PAT, está en medio de dos estaciones meteorológicas de manera muy cercana a una distancia menor de 2 km y SAP está aproximadamente a 2 km de la estación MAT(estación limnimétrica y pluviométrica). Para la cuenca Yanuncay puede ser igual de provechoso con 3 estaciones de Izhcayrrumi (IZH), Soldados en la PTAR (SOP), Yanuncay en Pucán (YAP), con un error menor del 3%.



De acuerdo a los indicadores hidrológicos, la forma de la curva de duración nos indica que la cuenca de Yanuncay tiene una menor pendiente que Tomebamba, por lo tanto es más regulada que la otra. Del análisis del evento extremo del 21 de abril en el río Yanuncay se puede apreciar que el tiempo de respuesta de la cuenca, para una precipitación que se dio en la zona media de la cuenca es de aproximadamente 2h10min, desde el pluviómetro más lejano hasta la salida de la cuenca; valores cercanos a 80 m³/s pueden provocar desbordamiento.

Con el análisis de los resultados en los diferentes indicadores hidrológicos tabla 39, la cuenca de Yanuncay recibe menor precipitación promedio anual con una mayor pérdida de agua por evapotranspiración que Tomebamba, tiene una mejor regulación, mayor estabilidad en los caudales, y una mayor capacidad de almacenamiento. En cambio, Tomebamba presenta una baja capacidad de regulación de caudales en época de verano, menor estabilidad de caudales y muestra una baja capacidad de amortiguamiento a eventos extremos.

Según el estudio de “The properties of the soils of the south Ecuadorian paramo and the impact of land use changes on their hydrology” (Buytaert, 2004), llega a concluir que en las cuencas alto-andinas, el movimiento del agua predomina el flujo lateral subsuperficial (en sentido de la pendiente), algo similar ocurre en nuestras cuencas de estudio. El coeficiente de escorrentía para Tomebamba (área de 300,12km²) es de 49% mayor a Yanuncay (área de 416,27km²) con 45%, además con un rango altitudinal de 1262 metros y de 1228 metros, respectivamente, a lo que le agregamos la pendiente de la cuenca Tomebamba (22,16%) es mayor a la pendiente de la cuenca Yanuncay (15,30%), lo que define un mayor escurrimiento y velocidad de la cuenca Tomebamba sobre la cuenca Yanuncay.

La información empleada para esta investigación fueron evidencias científicas que constituyen una importante base para la toma de decisiones, por lo que pueden incluirse o tomarse en cuenta para las políticas locales, provinciales, nacionales de ordenamiento territorial para uso y manejo de suelo.



Finalmente, realizamos el análisis comparativo de cuencas pareadas en cuanto a su comportamiento hidrológico y estado actual del recurso hídrico durante el año 2015. Aumentamos el conocimiento sobre la disponibilidad de agua y la capacidad de regulación de los ecosistemas, comparamos dos cuencas con una clara variabilidad espacial de los procesos hidrológicos de cada una. Resaltamos que es de suma importancia mantener los páramos lo más inalterados posible, pues como se observó las cuencas naturales (cubiertas con páramo), aunque con ciertas diferencias, mantienen mejor las características naturales como es la regulación y disponibilidad hídrica. Gracias al análisis del balance hidrológico pudimos estimar la regulación hídrica, e identificamos las similitudes y diferencias en la respuesta hidrológica de las dos cuencas estudiadas.

7. RECOMENDACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Recomendamos a ETAPA EP, que en la cuenca Tomebamba puede cerrarse el balance hidrológico con un error menor al 1% con 5 estaciones (Toreadora, Virgen El Cajas, Piscícola Chirimachay, Mamamag Camping y Matadero Sayausí). Es decir que para efectos del balance las estaciones Patoquinoas y Sayausí en la PTAP, no son requeridas y pueden ser movidas a otro lugar donde se requiera hacer monitoreo. Para la cuenca de Yanuncay se puede alcanzar un error menor al 3% con 3 estaciones (Izhcayrrumi, Soldados en PTAR, Yanuncay en Pucán); es decir que las estaciones Ventanas y Huizhil, podrían ser movidas a otro lugar, ya que estas se encuentran muy cercanas a estaciones que presentan el mismo régimen de precipitación.

Este análisis debe extenderse en el futuro usando una serie de datos más robusta. Realizar un análisis lluvia – escorrentía con datos históricos de las cuencas para generación de las curvas de duración – excedencia y duración – intensidad; así ETAPA EP puede hacer uso de esta información en su toma de decisiones para el cantón Cuenca.

Elaborar un plan de manejo integral de las 3 cuencas que cursan por el cantón Cuenca (Tarqui, Tomebamba y Yanuncay). En base a la información obtenida a pequeña escala, abra paso a que se desarrollen análisis a escalas más



grandes, así mismo como comparaciones entre ecosistemas y de variabilidad espacial de los procesos hidrológicos. Esto con la finalidad de conocer más a fondo la disponibilidad del recurso agua, para la toma de decisiones sobre la conservación y preservación de estas 3 cuencas. Para mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrológico de los páramos es necesario aumentar los sitios de monitoreo, con el objetivo de cubrir una mayor diversidad de las características ambientales en los Andes, tales como clima, cobertura y uso de la tierra.

Se debe plantear redes de trabajo articuladas entre la sociedad civil, los institutos de investigación y los organismos del Estado rectores de la temática, para compartir información y encontrar maneras más eficientes de responder a las demandas de conocimiento requerido para una buena toma de decisiones y un diseño de políticas.

Investigaciones Futuras

A partir de lo estudiado en esta investigación y desde los resultados obtenidos se recomienda realizar los siguientes estudios que complementen este trabajo investigativo.

- Realizar un análisis de la cobertura vegetal con información de ortofotos históricas para la terminación de los impactos ambientales en cuanto al cambio de uso de tierras y su comportamiento hidrológico.
- Realizar un análisis sobre la alteración de los procesos hidrológicos a nivel del suelo y subsuelo por pastoreo extensivo (carga animal) y la intensidad de las quemas.
- Realizar mediciones durante los siguientes años del índice de estacionalidad para tener resultados informativos comparativos sobre los diferentes regímenes de precipitación que se desarrolla en las cuencas analizadas.
- Seguir realizando monitoreo con la aplicación de indicadores hidrológicos de regulación, disponibilidad y rendimiento para la verificación de los resultados y compararlos entre sí.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Evapotranspiración de cultivos- Directrices para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos-FAO.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56 - Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.
- Andrade, L., & Ríos, C. (2014). Variabilidad Climática y Caudales Mínimos en los Andes Ecuatorianos.
- Astudillo, P., Tinoco, B., & Siddons, D. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records, (Marzo), 37.
- Azagra, A. (2006). Método de los coeficientes de escurrimiento. Método Generalizado. Universidad de Valladolid.
- Barrera, V. H., Alwang, J., & Cruz, E. (2010). Experiencias en el manejo integrado de recursos naturales en la subcuenca del río Chimbo. *INIAP*.
- Beltrán, K., Cuesta, S., León Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., & Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *Proyecto Páramo Andino Y Herbario QCA, EcoCiencia*.
- Beniston, M. (1997). Climatic change at high elevation sites; a review. *Climatic Change*.
- Bercián, K., & Palomo, K. (2004). *Revisión de metodologías para extensión y relleno de datos en series históricas, y su aplicación a los ríos de El Salvador*.
- Bièvre, B. De, Buytaert, W., & Iñiguez, V. (2014). Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. *Conocer para conservar*, 16.
- Buytaert, W. (2004). *The properties of the soils of the south Ecuadorian paramo and the impact of land use changes on their hydrology*.
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. De, Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos, 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Célleri, R., Bièvre, B. De, Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). Analysis of the water balance of small páramo catchments in south Ecuador, 8.
- Célleri, R. (2007). Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute river basin–Southern Ecuadorian Andes.
- Célleri, R., Bièvre, B. De, & Iñiguez, V. (2004). Efectos de la cobertura vegetal en la regulación.
- Célleri, R., Bièvre, B. De, Ochoa, B., & Villacís, M. (2013). Guía metodológica para el



monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos. *Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos*, 27.

Célleri, R., & Jan, F. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems : Importance , Knowledge Status , and Perspectives, 29(4), 350–355.

Chacón, J. (2003). Riesgos de origen geológico y geomorfológico: Deslizamientos de tierras, identificación, análisis y prevención de sus consecuencias. *Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 33.

Chereque, W. (1989). Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil.

Chow, M. (1998). Procesamiento de los datos de precipitación (Trabajo Práctico N°2, Universidad Nacional del Noroeste, Hidráulica), 45.

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., & Bièvre, B. De. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *CONDENSAN*, 45.

Crespo, P. J., Fayen, J., Buytaert, W., Büker, A., Breuer, L., & George Frede, H. (2011). Identificación de los controles de la respuesta de lluvia y escorrentía de las cuencas pequeñas en los Andes Tropicales (Ecuador), 407, 164–167.

De Bièvre, B. (2016). Monitoreo para la evaluación del impacto de las intervenciones en cuencas, 1–27.

Dirección de Planificación. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca. Actualización de la Propuesta, Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cuenca, Unidad Estratégica Territorial, Cuenca. Cuenca-Azuay.*

Doorenbos, J., & Kassam, A. (1979). FAO Estudio de Riego. En O. d. Alimentación, Yield response to water, 1–193.

E.M. (2016, June 20). Dos ríos de Cuenca están en prealerta de desbordamiento. *El Comercio*, p. 1.

Edeso, J., Marauri, P., & Merino, A. (1995). Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión, 18, 67.

Espinoza, R. (2010). Nuestros ríos son las vidas. *Avance*, 3.

FAO 56. (1990). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Estudio FAO Riego y Drenaje.

Gualpa, M. (2013). *Efecto de la incertidumbre de las observaciones hidrometeorológicas en estudios hidrológicos (Zhurucay, Mazar y Soldados)*.



- Guallpa, M. (2014a). Protocolo de Control de Calidad de Datos Hidrológicos Para Ecosistemas Andinos, 23.
- Guallpa, M. (2014b). Protocolo de control de calidad de datos hidrometeorológicos de la red de ETAPA EP, 29.
- Guallpa, M. (2014c). Protocolo para transformar niveles de agua a caudales en vertederos, 1–3.
- Guallpa, M. (2015). Caracterización morfométrica de áreas de drenaje de las estaciones hidrológicas de la red de ETAPA EP, 1–28.
- Hofstede, R. (2001). El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. Los páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas. Ecuador.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. M. (2005). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (C). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica Y Del Medio Natural, Producción Vegetal*, 2, 65.
- Jaramillo, A., & Guzmán, V. (2012). *Impacto de la calidad de datos en el cierre del balance hídrico correspondiente a la zona de Soldados y Mazar, respectivamente.*
- Jothityangkoon, C., Sivapalan, M., & Farmer, D. (2001). Controles del proceso de la variabilidad del balance hídrico en una cuenca semiárida: enfoque descendente del desarrollo del modelo hidrológico, 67.
- Llambí, L. D., Célleri, R., Bièvre, B. De, Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología y suelos del páramo., 123.
- Luna, E., & Lavado, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque , Perú. *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*, 28(Noviembre), 42–52.
- Martínez, E. (2015). *Análisis hidrológico y respuesta lluvia-escorrentía de cuatro microcuencas de alta montaña del sur del Ecuador.*
- Martínez, M., Fernández, D., & Salas, R. (2007). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Colegio de Postgraduados. Unidad Técnica Especializada (UTE) COUSSA, Subsecretaría de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyo Para El Desarrollo Rural, Montecillo*, 76.
- Maza, A. (2016). *Estudio comparativo entre modelos de estimación de radiación y déficit de presión de vapor en dos gradientes altitudinales.*
- Medina, G., & Patricio, M. (2001). Los páramos en el Ecuador. *Los Páramos Del Ecuador. Particularidades, Problemas Y Perspectivas. Proyecto Páramo. Fundación Ecuatoriana de Estudios Ecológicos.*, 125.



- Montoya, S. (2014). Métodos de estimación para completar datos de precipitación. *Gestión Sostenible Del Agua*, 1–22.
- Mora, D., & Willems, P. (2012). Decadal Oscillations in Rainfall and Air Temperature in the Paute River Basin-Southern Andes of Ecuador. *ResearchGate*, 1–19.
- Morán, W. (2003). Hidrología para estudiantes de Ingeniería civil. *CONCYTEC*, 44.
- Ochoa, B. (2013). Protocolo de uso del script de Agregación y Promedio, 6.
- Ochoa, B. Regionalización de indicadores hidrológicos para evaluar impactos de los cambios de uso de la tierra en los Andes Tropicales (2014).
- Ochoa, B., Fitzimons, B., & Bièvre, B. De. (2012). Parámetros e indicadores hidrológicos para ecosistemas andinos, 24, 27.
- OMM-N° 168. (2010). Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. OMM-N°8. Organización Meteorológica Mundial, 277.
- OMM-N° 168. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas. OMN-N°168, 6th edition. Adquisición y Proceso de Datos, Análisis, Predicción y otras Aplicaciones.* Organización Meteorológica Mundial.
- Oñate, F. (2009). Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial, 54.
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, (julio), 985–996.
- Pedersen, L., Jensen, N. E., Christiansen, L. E., & Madsen, H. (2010). Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, 95, 441–454.
- Piedra, A. Estudio ambiental (ExPost) del sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento (2017).
- Pizarro, R. (1993). Proyecto Regional mayor sobre el uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. *UNESCO-ORCYT*, 145.
- Pozo de Castro, M. (2001). Los usos del suelo en la gestión de los recursos hídricos mediante sistemas de teledetección. En Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea, 1–119.
- Roa, C. (2011). Calibración e Instalación de Pluviómetro - Proyecto de Adaptación al Cambio Climático en Acueductos Rurales Colombianos. *Yumpu*, 76.
- Rocco, J., & Ojeda, C. (2011). Metodología para selección de modelos de regresión lineal múltiple basada en métodos multiobjetivo, 1–19.



- Rodrigo, M., & Fernández, M. E. (2014). Estimación de datos faltantes de precipitación diaria para las distintas ecorregiones de la República Argentina. *Acultad de Agronomía, Cátedra de Climatología Y Fenología Agrícolas*, 78.
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2011). Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*, 99(2), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.018>
- Sánchez, J. (2013). *Cálculos Estadísticos en Hidrología*. Salamanca-España.
- Sivisaca, J., & Lenin, O. (2011). *Estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca alta del río Catamayo hasta la estación el Arenal en el sitio el Boquerón*. Loja.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. C. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Cuia internacional de investigación y métodos* (Comité Esp). Madrid-España: Methods for Water Balance Computation. No 17 de la serie "Studies and Reports in Hydrology."
- Tapia, D. (2016). *Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de una gradiente altitudinal*.
- Thompson, S. (2011). *Análisis histórico de la cobertura del suelo de la subcuenca del bajo río Mazar*. Cuenca-Azuay.
- UNESCO. (2006). Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. En Documentos Técnicos del PHI-LAC, 24, 154.
- Vallejo, E. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*.
- Vasco, S., Rodríguez, S., Rodas, F., Pesántez, M., Cabrera, S., Romero, M., ... Vallejo, S. (2012). Propuesta para la declaratoria de la reserva de biósfera dirigida a la UNESCO denominada: Área de biosfera macizo del cajas.
- Vásconez, P., & Hofstede, R. (2006). *Los páramos ecuatorianos*. La Paz.
- Walsh, P., & Lawler, D. (1981). Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 201–208.
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). *Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions*.
- Willems, P. (2004). WETSPRO : Water Engineering Time Series PROcessing tool, 22.
- Zuluaga, C., Henao, D., Adarve, D., Ramírez, V., Villaruel, A., Alcalá, A., & Ospina, H. (2011). *Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el Municipio de Cocorná*. Divegráficas Ltda. Concorná-Colombia.

9. ANEXOS

9.1. Descripción de las 16 buenas prácticas identificadas como modelos de actividades a ser fortalecidos y/o con potencial de réplica a nivel regional.

Tabla 40. Descripción de las 16 buenas prácticas en el COOTAD de la ciudad de Cuenca

| N° | Nombre de la buena práctica | Institución o Comunidad Responsable | Instituciones comunidades asociadas |
|-----------|---|---|---|
| 1 | Programa de monitoreo de recursos hídricos | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. Corporación Municipal PNC. | Universidad de Cuenca, Ecuador. Consejo de Gestión de la Cuenca del río Paute (CGPaute). Universidad de Lovaina-Bélgica. |
| 2 | Manejo descentralizado de Áreas Naturales Protegidas-Parque Nacional Cajas | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. Corporación Municipal PNC. | Ministerio del Ambiente del Ecuador. Universidad de Cuenca. Universidad del Azuay. Naturaleza y Cultura Internacional. |
| 3 | Manejo Turístico | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. Corporación Municipal PNC. | Ministerio del Ambiente del Ecuador. Comunidad de Migüir. |
| 4 | Manejo y conservación de ecosistemas de manglar mediante la concesión asociaciones de cangrejeros | Asociación de Cangrejeros 6 de Julio. | Ministerio del Ambiente Ecuador. USAID. Fundación de Rescate Jambelí. |
| 5 | Gestión de sistemas de agua y saneamiento | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. Corporación Municipal PNC. | 120 Sistemas de agua y saneamiento. |
| 6 | Transferencia de capacidades asociativas para la creación de la | Gobierno Provincial del Azuay (GPA) | Instituto Nacional Autónomo de Investigación Agropecuarias (INIAP). Red de Cacaocultores |



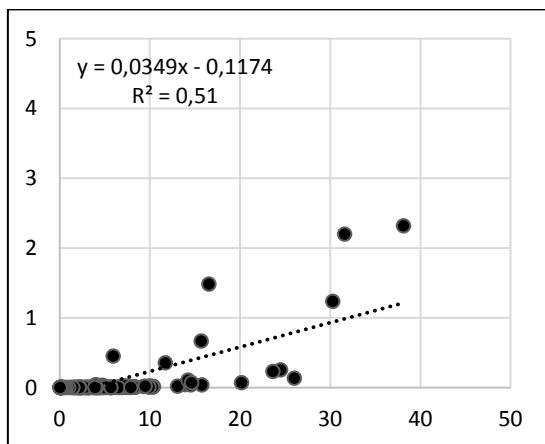
| | | | |
|----|--|---|---|
| | cadena productiva del cacao | | artesanales del Azuay (REDCAZ). |
| 7 | Conservación de la Vegetación Nativa con el Programa Socio Bosque | Ministerio del Ambiente Ecuador. | ETAPA EP. Consortio Público de la Cuenca del Río Jubones. |
| 8 | Manejo de Áreas Protegidas Privadas para la Protección de Fuentes Hídricas | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. Subgerencia de Gestión Ambiental. | Ministerio del Ambiente Ecuador. 4 comunidades rurales. |
| 9 | Producción de Banano Orgánico. | Asociación de Pequeños Productores Bananeros El Guabo (ASOGUABO). | 15 comunidades asociadas en las provincias de El Oro, Azuay y Guayas. |
| 10 | Turismo Comunitario | Comunidad Chilcatotora. | Comunidad de Parcoloma. Ministerio de Inclusión Económica y Social (MIES). Fundación Pakariñan. |
| 11 | Gestión de desechos sólidos | Ilustre Municipio de Cuenca. Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC). | Juntas Parroquiales. Municipios. Empresas particulares. |
| 12 | Programa de recolección de Pilas Usadas | ETAPA EP. | Ilustre Municipio de Cuenca. Instituciones educativas primarias, secundarias y superiores. Sector Industrial y comercial. |
| 13 | Programa de control de contaminación por aceites usados | Ilustre Municipalidad de Cuenca. ETAPA EP. | Mecánicas, lavadoras, lubricadoras y establecimientos generadores de desechos líquidos peligrosos. |
| 14 | Manejo | Ilustre Municipalidad de | Agencia Alemana de |

| | | | |
|----|--|---|---|
| | integrado de cuencas para la protección de fuentes de agua | Cuenca. ETAPA EP. Subgerencia de Gestión Ambiental. | Cooperación (GIZ). Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). RARE Internacional. Consejo de Gestión de la Cuenca del Río Paute (CGPaute). Instituto Autónomo de Investigación Agropecuarias (INIAP). Junta Parroquial de Victoria del Portete. |
| 15 | Tratamiento de Aguas Residuales | ETAPA EP. | Ilustre Municipalidad de Cuenca. |
| 16 | Producción Agroecológica | Familia Villacís. | Gobierno Provincial del Azuay. |

Elaborado por: Autores. Fuente: Propuesta para la declaratoria de una Reserva de Biósfera en el Macizo del Cajas - Ecuador 2012

9.2. Figuras de dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Tomebamba.

Correlación Matadero Sayausí-Quinta Balzay



Correlación Matadero Sayausí-Tomebamba Quinta Balzay.

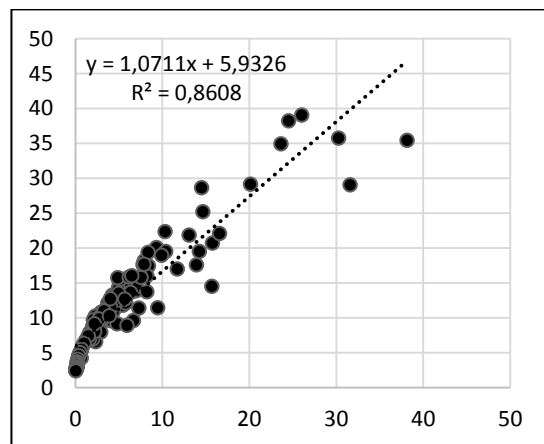


Figura 33. Dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Tomebamba

9.3. Figuras de dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Yanuncay.

Correlación entre los datos de Yanuncay en
Pucán-Soldados en la PTAR.

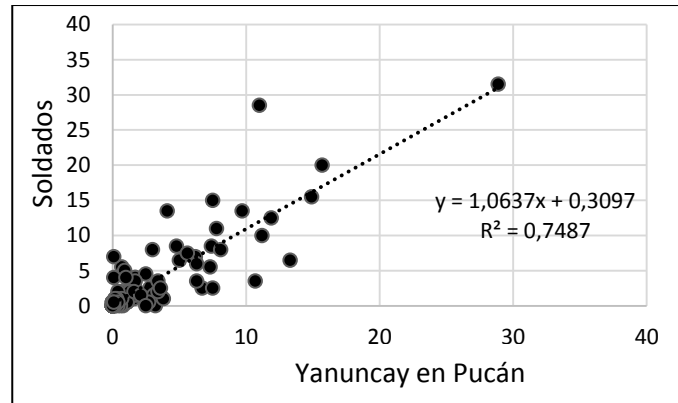
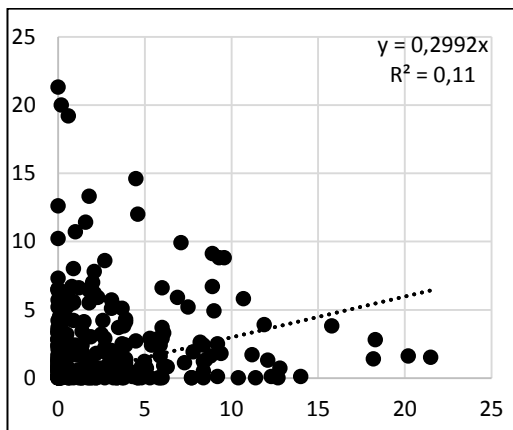


Figura 34. Dispersión de caudal entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal para la cuenca Yanuncay

9.4. Figuras de dispersión de precipitación (lluvia), entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Tomebamba.

Correlación entre los datos de
Patoquinoas-Toreadora



Correlación entre los datos de
Patoquinoas-Virgen El Cajas

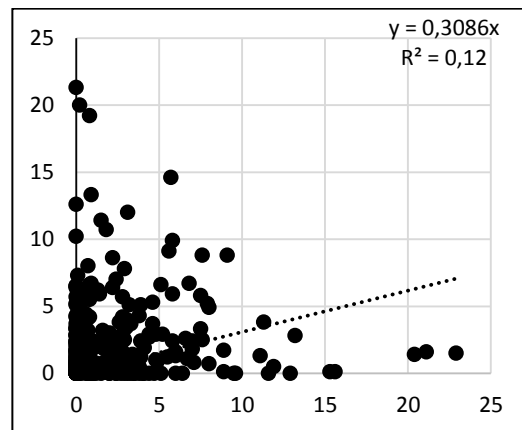


Figura 35. Dispersión de precipitación entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Tomebamba

9.5. Figuras de dispersión de precipitación (lluvia), entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Yanuncay.

Correlación entre los datos de Izhicayrumi y Ventanas.

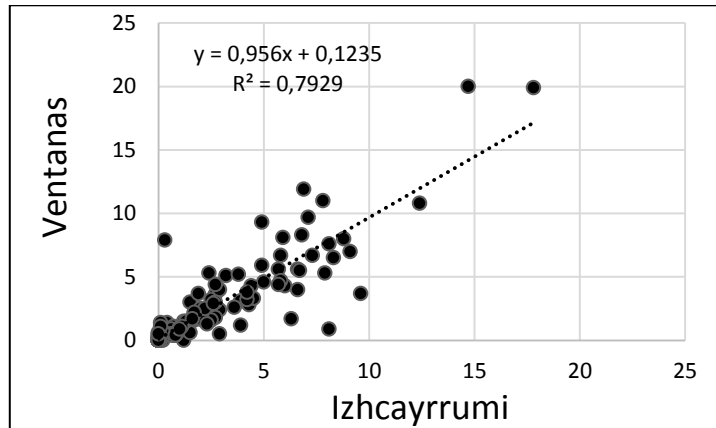


Figura 36. Dispersión de precipitación entre la serie original y las series rellenadas con regresión lineal en la cuenca Yanuncay

9.6. Valores de las áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos mediante el software ARCGIS 10.4, en la cuenca Tomebamba.

Tabla 41. Áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos en la cuenca Tomebamba.

| Estaciones | ÁREAS POLÍGONOS DE THIESSEN PARA TOMBAMBA | | | | | | |
|-------------------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| PAT | 10,14 | | | | | | |
| SAP | 35,78 | 35,78 | | | | | |
| MAC | 70,71 | 70,88 | 70,88 | | | | |
| VEC | 38,12 | 43,85 | 43,85 | 50,31 | | | |
| TOR | 16,67 | 20,91 | 20,91 | 44,90 | 71,05 | | |
| MAS | 25,06 | 25,06 | 51,56 | 51,56 | 51,56 | 51,56 | |
| PIC | 103,63 | 103,63 | 112,92 | 153,35 | 177,51 | 248,56 | 300,12 |
| Área Total | 300,12 | 300,12 | 300,12 | 300,12 | 300,12 | 300,12 | 300,12 |

Zona de estudio Tomebamba: PAT, Patoquinoas; SAP, Sayausí PTAP; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; TOR, Toreadora; MAS, Matadero Sayausí; PIC, Piscícola Chirimachay.



9.7. Valores de las áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos mediante el software ARCGIS 10.4., en la cuenca Yanuncay.

Tabla 42. Áreas de los polígonos de Thiessen obtenidos en la cuenca Yanuncay.

| Estaciones | ÁREAS POLÍGONOS DE THIESSEN PARA YANUNCAY | | | | |
|-------------------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| HUI | 39,00 | | | | |
| VEN | 37,82 | 37,82 | | | |
| SOP | 148,68 | 148,68 | 148,68 | | |
| IZH | 105,87 | 105,87 | 143,70 | 247,30 | |
| YAP | 84,88 | 123,88 | 123,88 | 169,00 | 416,27 |
| Área Total | 416,27 | 416,27 | 416,27 | 416,27 | 416,27 |

Zona de estudio Yanuncay: HUI, Huizhil; VEN, Ventanas; SOP, Soldados PTAR; IZH, Izhcayrumi; YAP, Yanuncay en Pucán.

9.8. Valores del histograma de pendientes en porcentajes y el valor de la pendiente media para la cuenca Tomebamba.

Tabla 43. Porcentajes de pendientes para la cuenca Tomebamba

| HISTOGRAMA PENDIENTES CUENCA TOMBAMBA | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|-------|-------------------|-------------------------|-------------|
| N° | Rango Pendiente (%) | | N° Ocurrencias | Promedio * N° Ocorre | % Pendiente |
| 1 | 0-5 | 2,5 | 2805,00 | 7012,50 | 6,12 |
| 2 | 5-12 | 8,5 | 8191,00 | 69623,50 | 17,89 |
| 3 | 12-18 | 15 | 8587,00 | 128805,00 | 18,75 |
| 4 | 18-24 | 21 | 5831,00 | 122451,00 | 12,73 |
| 5 | 24-32 | 28 | 12860,00 | 360080,00 | 28,08 |
| 6 | 32-44 | 38 | 6106,00 | 232028,00 | 13,33 |
| 7 | 44-89,99 | 67,00 | 1416,00 | 94864,92 | 3,09 |
| TOTAL | | | 45796,00 | 1014864,92 | |
| | | | Pendiente Media % | 22,16 | |



9.9. Valores del histograma de pendientes en porcentajes y el valor de la pendiente media para la cuenca Yanuncay.

Tabla 44. Porcentajes de pendientes para la cuenca Yanuncay

| HISTOGRAMA PENDIENTES CUENCA YANUNCAY | | | | | |
|--|----------------------------|-------|--------------------------|---------------------------------|--------------------|
| No | Rango Pendiente (%) | | No Ocurrencias | Promedio * No Ocurre | % Pendiente |
| 1 | 0-5 | 2,5 | 3328,00 | 8320,00 | 21,23 |
| 2 | 5-12 | 8,5 | 5666,00 | 48161,00 | 36,14 |
| 3 | 12-18 | 15 | 2617,00 | 39255,00 | 16,69 |
| 4 | 18-24 | 21 | 1520,00 | 31920,00 | 9,70 |
| 5 | 24-32 | 28 | 1293,00 | 36204,00 | 8,25 |
| 6 | 32-44 | 38 | 271,00 | 10298,00 | 1,73 |
| 7 | 44-89,99 | 67,00 | 981,00 | 65722,10 | 6,26 |
| TOTAL | | | 15676,00 | 239880,10 | |
| | | | Pendiente Media % | 15,30 | |



9.10. Régimen mensual de precipitaciones de las dos cuencas de estudio.

Tabla 45. Régimen mensual de precipitación de las cuencas Tomebamba y Yanuncay

| Régimen mensual de precipitación | | |
|---|-----------------|------------------|
| Mes | Yanuncay | Tomebamba |
| Enero | 92,51 | 112,88 |
| Febrero | 33,53 | 55,71 |
| Marzo | 130,59 | 145,70 |
| Abril | 85,53 | 116,56 |
| Mayo | 46,77 | 80,76 |
| Junio | 68,23 | 104,21 |
| Julio | 88,04 | 96,78 |
| Agosto | 17,59 | 36,83 |
| Septiembre | 29,59 | 30,97 |
| Octubre | 70,83 | 107,18 |
| Noviembre | 64,10 | 83,48 |
| Diciembre | 16,58 | 36,43 |



9.11. Valores de la precipitación (Error) ponderada con las áreas obtenidas anteriormente.

Tabla 46. Valores de la precipitación promedio ponderada de la cuenca Tomebamba.

| CÓDIGO | PRECIPITACIÓN PONDERADA PARA TOMBAMBA | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| PAT | 26,55 | | | | | | |
| SAP | 106,89 | 106,89 | | | | | |
| MAC | 283,84 | 284,55 | 284,55 | | | | |
| VEC | 109,20 | 125,61 | 125,61 | 144,12 | | | |
| TOR | 53,47 | 67,07 | 67,07 | 143,97 | 227,83 | | |
| MAS | 60,16 | 60,16 | 123,77 | 123,77 | 123,77 | 123,77 | |
| PIC | 367,38 | 367,38 | 400,30 | 543,65 | 629,30 | 881,17 | 1063,94 |
| P. Total | 1007,50 | 1011,65 | 1001,29 | 955,51 | 980,91 | 1004,94 | 1063,94 |

Zona de estudio Tomebamba: PAT, Patoquinoas; SAP, Sayausí PTAP; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; TOR, Toreadora; MAS, Matadero Sayausí; PIC, Piscícola Chirimachay.

9.12. Intensidades máximas de las dos cuencas.

Tabla 47. Valores de las intensidades máximas analizadas en las cuencas de estudio.

| Minutos | CUENCA YANUNCAY | | CUENCA TOMBAMBA | | |
|------------|-----------------|-------|-----------------|-------|--------|
| | SOP | IZH | SAP | MAC | MAS |
| 5 | 48,00 | 38,40 | 70,80 | 46,80 | 108,00 |
| 10 | 38,40 | 36,60 | 61,80 | 39,00 | 103,20 |
| 15 | 37,60 | 30,80 | 57,60 | 36,00 | 81,60 |
| 30 | 30,00 | 28,80 | 43,60 | 25,60 | 43,20 |
| 60 | 20,40 | 20,70 | 24,10 | 14,80 | 28,20 |
| 120 | 11,90 | 11,25 | 14,10 | 8,90 | 14,25 |
| 300 | 6,56 | 4,76 | 6,50 | 3,94 | 5,70 |

Zona de estudio Tomebamba: PAT, Patoquinoas; SAP, Sayausí PTAP; MAC, Mamamag Camping; VEC, Virgen El Cajas; TOR, Toreadora; MAS, Matadero Sayausí; PIC, Piscícola Chirimachay.

9.13. Figura de intensidad- duración, de todas las estaciones en las cuencas Yanuncay y Tomebamba.

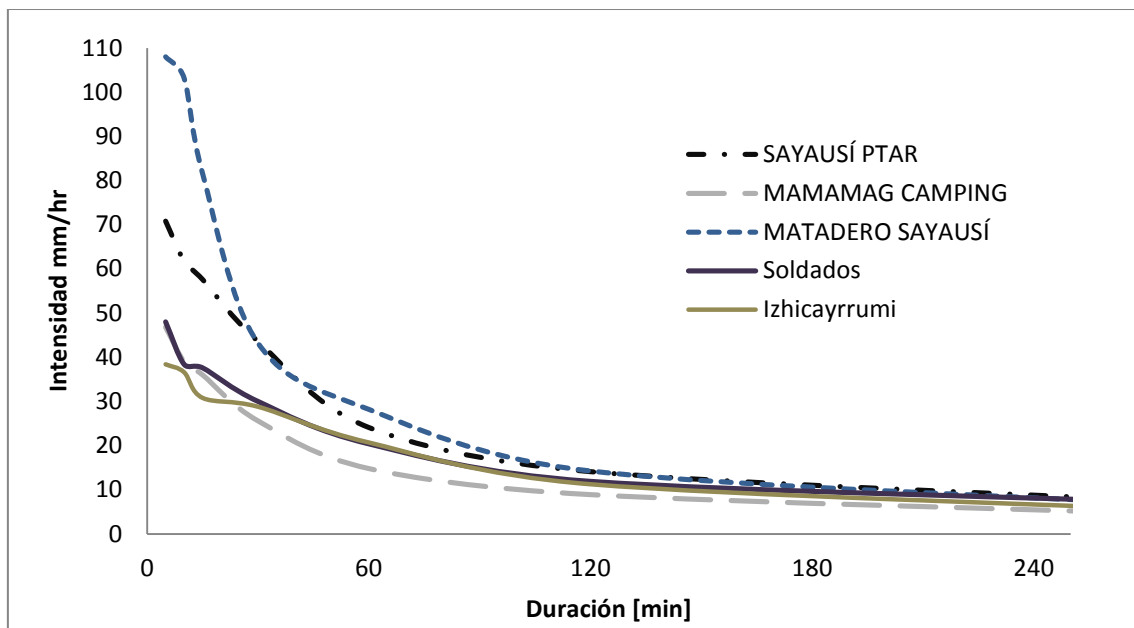


Figura 37. Curva de duración-intensidad para cada estación analizada en la cuenca Tomebamba y Yanuncay

9.14. Figura de porcentajes de uso de suelo cuenca Tomebamba.

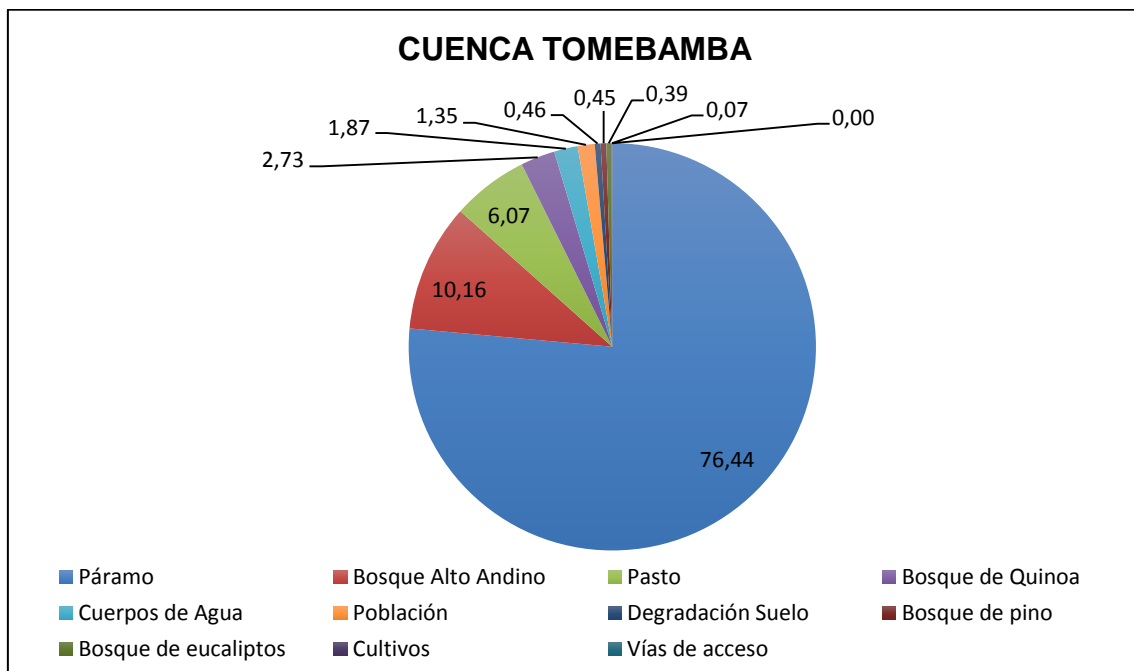


Figura 38. Porcentajes de uso de suelo cuenca Tomebamba

9.15. Figura de porcentajes de uso de suelo cuenca Yanuncay.

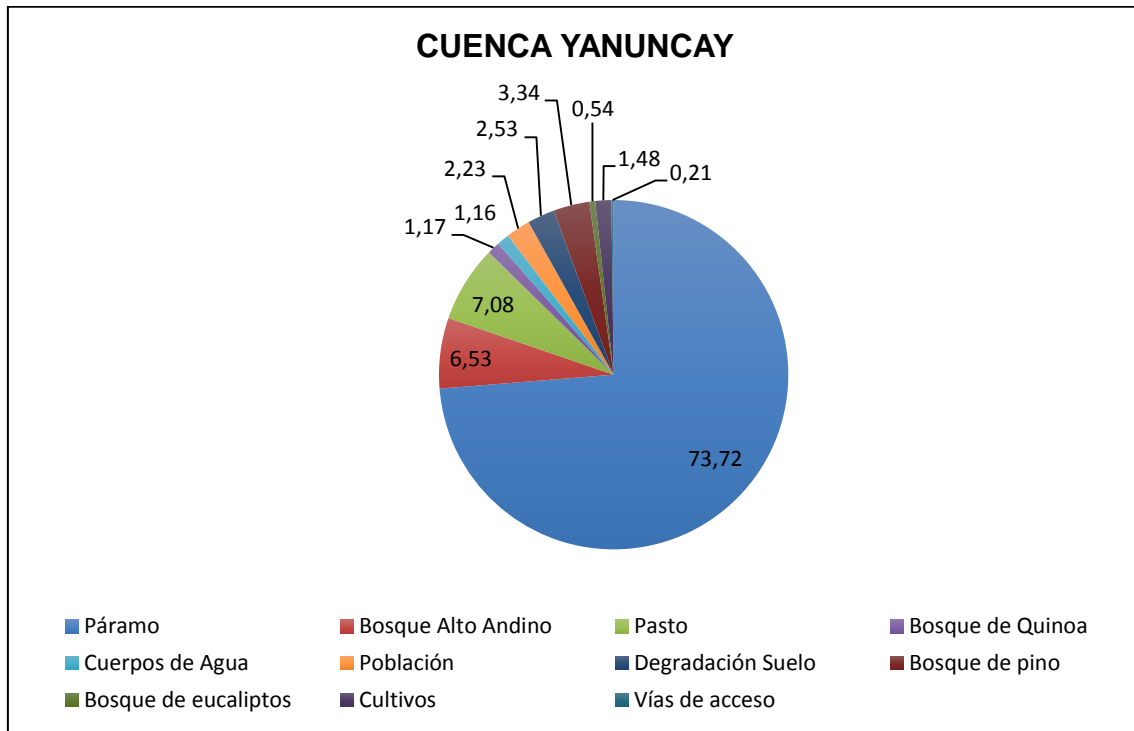


Figura 39. Porcentajes de uso de suelo cuenca Yanuncay

9.16. Tabla de análisis de variables determinadas en el software ArcGis 10.4 para entender mejor el comportamiento hidrológico sobre las dos cuencas de estudio.

Para una mejor identificación del comportamiento hidrológico hemos empleado información como shapes, imágenes en formato vector y raster de las zonas de estudio de forma sobrepuesto. Los mapas temáticos utilizados se presentan en la siguiente tabla 48.



Tabla 48. Mapas temáticos sobrepuestos utilizados en análisis del comportamiento hidrológico.

| Mapa | Formato | Representa |
|---|----------------|---|
| Pendientes | Raster | Distribución espacial en área de las zonas de estudio de la inclinación del terreno analizado |
| Cobertura Vegetal | Vector | La distribución espacial de las áreas destinadas a los diferentes usos, del suelo. |
| Red Hidrológica | Vector | La distribución espacial de los ríos principales y secundarios de las zonas de estudio. |
| Estaciones pluviométricas, limnimétricas y meteorológicas | Vector | La distribución espacial de las diferentes estaciones en el área de las zonas de estudio, cuya información sirvió para obtener resultados y conclusiones. |
| Precipitación | Raster | La distribución espacial de lluvia en el área de las zonas de estudio |
| Isoyetas | Vector | La distribución de la lluvia en un rango determinado (cada 75mm) en las zonas de estudio. |

A continuación se presenta la figura 40, con los mapas temáticos en sus diferentes formatos montados utilizando el sistema de coordenadas WGS84 con la finalidad de tener una mayor comprensión en el análisis del comportamiento hidrológico.

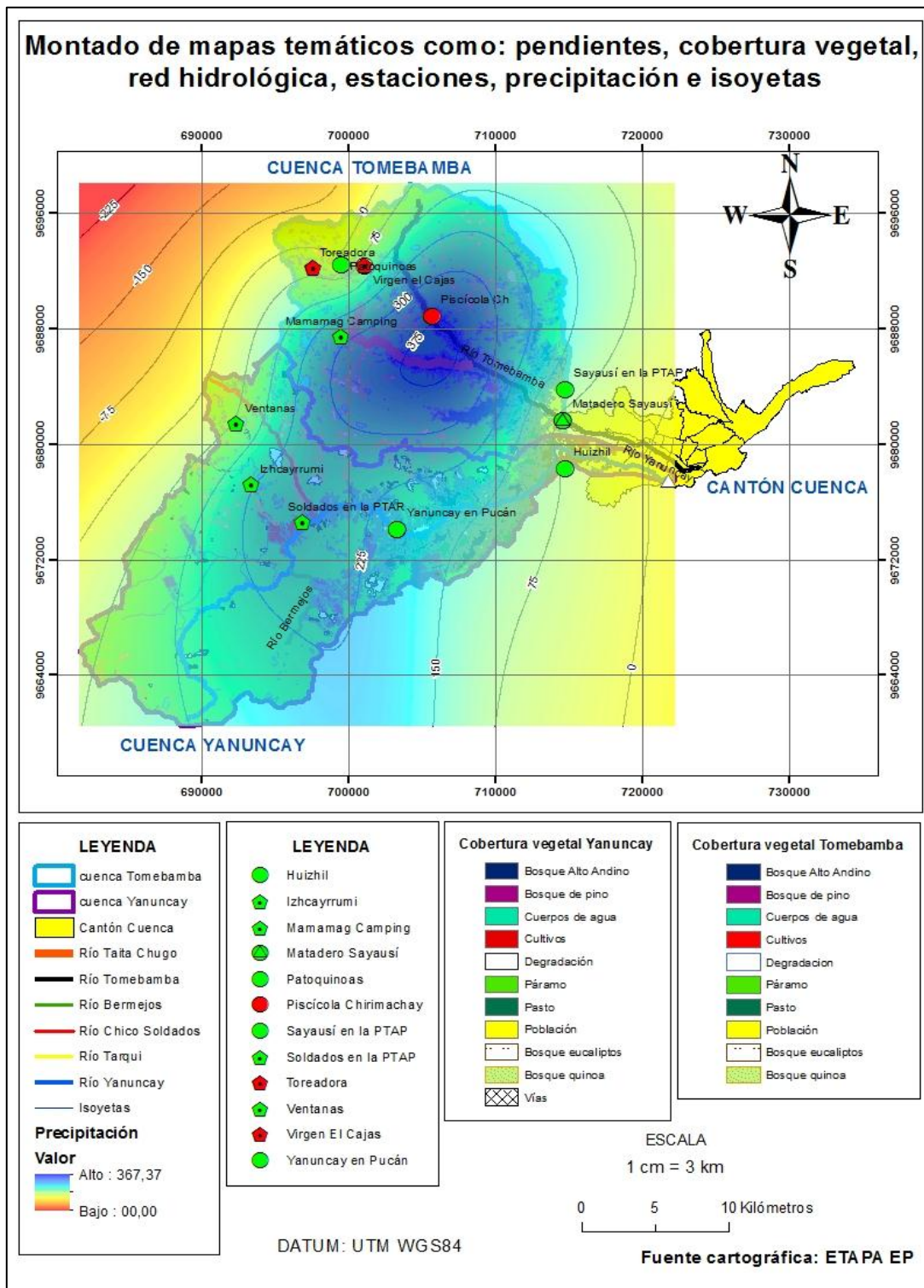


Figura 40. Montado de mapas temáticos como las pendientes, cobertura vegetal, red hidrológica, estaciones (pluviométricas, limnimétricas, meteorológicas), precipitación e isoyetas.

Modificación cartográfica: Autores.



9.17. Tabla orden de las estaciones en relación a las alturas sobre el nivel del mar y la precipitación promedio anual de cada estación de análisis.

Tabla 49. Orden de mayor a menor en las alturas de las estaciones y la precipitación promedio anual obtenida con los polígonos de Thiessen.

| Polígonos de Thiessen. | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Nombre Estación | Altura (m s.n.m.) | Precipitación (mm) |
| MAC | 3592 | 283,84 |
| PIC | 3298 | 367,37 |
| TOR | 3955 | 53,47 |
| SAP | 2847 | 106,89 |
| VEC | 3626 | 109,20 |
| PAT | 3795 | 26,55 |
| MAS | 2693 | 60,16 |
| IZH | 3748 | 220,85 |
| VEN | 3592 | 84,52 |
| SOP | 3269 | 258,49 |
| YAP | 3000 | 198,30 |
| HUI | 2773 | 67,79 |

Zona de estudio Tomebamba: MAC, Mamamag Camping; PIC, Piscícola Chirimachay; TOR, Toreadora; SAP, Sayausí PTAP; VEC, Virgen El Cajas; PAT, Patoquinoas; MAS, Matadero Sayausí. **Zona de estudio Yanuncay:** IZH, Izhcayrrumi; VEN, Ventanas; SOP, Soldados PTAR; YAP, Yanuncay en Pucán; HUI, Huizhil.



9.18. Tabla de gradiente altitudinal ajustada, conforme las distancias de de la estación más alta a la más baja en las dos cuencas.

Tabla 50. Orden de las estaciones en altura, relacionando la más alta y la más baja.

Orden de mayor a menor en las alturas de las estaciones

| | Código | Altura (m s.n.m.) | Distancia en metros cuenca alta-baja |
|-----------------|---------------|--------------------------|---|
| TOMBAMBA | TOR | 3955 | 0 |
| | PAT | 3795 | 1930 |
| | VEC | 3626 | 3500 |
| | MAC | 3592 | 5110 |
| | PIC | 3298 | 8740 |
| | SAP | 2847 | 19700 |
| | MAS | 2693 | 20030 |
| YANUNCAY | IZH | 3748 | 0 |
| | VEN | 3592 | 4300 |
| | SOP | 3269 | 4380 |
| | YAP | 3000 | 10450 |
| | HUI | 2773 | 21380 |
| | YAJT | 2520 | 29000,78 |

Zona de estudio Tomebamba: TOR, Toreadora; PAT, Patoquinoas; VEC, Virgen El Cajas; MAC, Mamamag Camping; PIC, Piscícola Chirimachay; SAP, Sayausí PTAP; MAS, Matadero Sayausí. **Zona de estudio Yanuncay:** IZH, Izhcayrrumi; VEN, Ventanas; SOP, Soldados PTAR; YAP, Yanuncay en Pucán; HUI, Huizhil; YAJT, Yanuncay A.J. Tarqui.

9.19. Análisis del rango de descarga, verificación de valores, y obtención de quintiles, cuartiles, deciles.

TOMBAMBA

Para obtener valores exactos para los 365 días del año en las dos cuencas hemos dividido para 5, de esta forma se obtienen números enteros, es decir cada 73 días.

Tabla 51. Quintiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba

| | | Quintiles Caudal específico (lt/km ²) | | | | | |
|------|--------|---|-----------|------|-----------|-----------|-----------|
| | | Quintil 1 | Quintil 2 | 50% | Quintil 3 | Quintil 4 | Quintil 5 |
| Mín. | Máx. | 20% | 40% | | 60% | 80% | 100% |
| 0,13 | 151,69 | 1,81 | 6,10 | 8,35 | 12,40 | 22,94 | 151,69 |

El 20% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 1,81 lt/km². El 40% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 6,10 lt/km². El 60% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 12,40 lt/km². El 80% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 22,94 lt/km². El 100% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 151,69 lt/km². El 50% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 8,35 lt/km².

El rango del caudal fluctúa entre un máximo de 151,69 lt/km². Y un mínimo de 0,13. Manteniéndose el 50% de las observaciones por debajo del caudal 8,35 lt/km².

Tabla 52. Cuartiles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba

| | | Cuartiles Caudal específico (lt/km ²) | | |
|------|--------|---|-----------|-----------|
| | | Cuartil 1 | Cuartil 2 | Cuartil 3 |
| Mín. | Máx. | 25% | 50% | 75% |
| 0,13 | 151,69 | 2,62 | 8,35 | 19,25 |

El cuartil Q(25) presenta un 25% de caudales específicos bajos entre el valor mínimo 0,13 y el valor 2,62 lt/km². El 25% con los caudales más altos se obtuvo entre el tercer cuartil Q(75) y el valor máximo. Es decir entre 19,26 lt/km² y 151,69 lt/km². Si tomamos el primer cuartil Q(25) y el tercer cuartil Q(75), podemos decir que el 50% del valor central de los caudales se obtuvo entre 2,62 – 19,26 lt/km².

Tabla 53. Deciles sobre los caudales específicos de la cuenca Tomebamba

| | | Deciles Caudal específico (lt/km ²) | | | | | | | | |
|------|--------|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | D10 | D20 | D30 | D40 | D50 | D60 | D70 | D80 | D90 |
| Mín. | Máx. | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
| 0,13 | 151,69 | 0,71 | 1,81 | 3,99 | 6,15 | 8,35 | 12,40 | 16,87 | 22,94 | 38,80 |

EL 10% de los caudales específicos más bajos están entre los 0,13 - 0,71 lt/km². El 90% de los caudales específicos más altos están entre los 38,81 lt/km² y el valor máximo que es 151,69lt/km².

Si vemos los valores entre el D(10) y el D(90), existe un 80% de caudales que están entre 0,71 – 38,81 lt/km².

YANUNCAY

Tabla 54. Quintiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay

| | | Quintiles Caudal específico (lt/km ²) | | | | | |
|------|-------|---|-----------|------|-----------|-----------|-----------|
| | | Quintil 1 | Quintil 2 | 50% | Quintil 3 | Quintil 4 | Quintil 5 |
| Mín. | Máx. | 20% | 40% | | 60% | 80% | 100% |
| 2,24 | 70,29 | 3,79 | 6,41 | 8,33 | 10,48 | 18,17 | 70,29 |

El 20% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 3,79 lt/km². El 40% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 6,41 lt/km². El 60% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 10,48 lt/km². El 80% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 18,17 lt/km². El 100% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 70,29 lt/km². El 50% de las observaciones obtenidas se sitúan en un caudal menor a 8,33 lt/km².

El rango del caudal fluctúa entre un máximo de 70,29 lt/km². Y un mínimo de 2,24 lt/km². Manteniéndose el 50% de las observaciones por debajo del caudal 70,29 lt/km².

Tabla 55. Cuartiles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay

| Cuartiles Caudal específico (lt/km ²) | | | | |
|---|-------|-----------|-----------|-----------|
| | | Cuartil 1 | Cuartil 2 | Cuartil 3 |
| Mín. | Máx. | 25% | 50% | 75% |
| 2,24 | 70,29 | 4,27 | 8,33 | 15,29 |

El cuartil Q(25) presenta un 25% de caudales específicos bajos entre el valor mínimo 2,24 y el valor 4,27 lt/km². El 25% con los caudales más altos se obtuvo entre el tercer cuartil Q(75) y el valor máximo. Es decir entre 15,29 lt/km² y 70,29 lt/km². Si tomamos el primer cuartil Q(25) y el tercer cuartil Q(75), podemos decir que el 50% del valor central de los caudales se obtuvo entre 4,27 – 15,29 lt/km².

Tabla 56. Deciles sobre los caudales específicos de la cuenca Yanuncay

| Deciles Caudal específico (lt/km ²) | | | | | | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | D10 | D20 | D30 | D40 | D50 | D60 | D70 | D80 | D90 |
| Mín. | Máx. | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
| 2,24 | 70,29 | 3,03 | 3,79 | 4,79 | 6,40 | 8,33 | 10,47 | 13,37 | 18,16 | 26,56 |

EL 10% de los caudales específicos más bajos están entre los 2,24 – 3,03 lt/km². El 90% de los caudales específicos más altos están entre los 26,56 lt/km² y el valor máximo que es 70,29 lt/km². Si vemos los valores entre el D(10) y el D(90), existe un 80% de caudales que están entre 3,03 – 26,56 lt/km².



9.20. Programa WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool.

Al ocurrir un evento de precipitación, hay una parte que se convierte en escorrentía superficial, una parte se infiltra en el suelo convirtiéndose en un flujo subsuperficial. Posteriormente 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 más tiempo (semanas, varios años o incluso décadas) antes de salir hacia los cauces (Llambí, Luis Daniel; Soto-W, Alejandra; Célleri, Rolando; De Bièvre, Bert; Ochoa, Boris; Borja, Pablo;, 2012). Para separar la serie de caudales en sus subflujos, utilizamos el software WETSPRO. Nuestro interés es poder analizar el flujo base, existe otro procedimiento para la obtención del flujo subsuperficial y superficial, para mayor detalle ver el estudio de Water Engineering Time Series PROcessing tool. KU Leuven Hydraulics Laboratory, Leuven Belgium (Willems, 2004) .

Los caudales que se separaron se definen como:

Flujo base: Es el caudal conformado por el agua que fluye desde el almacenamiento del agua subterránea hacia los cauces. Ocurre cuando los cauces captan agua subterránea, sea esta proveniente del nivel freático o de acuíferos más profundos.

Flujo subsuperficial: Es el caudal relativamente rápido que va hacia el cauce y se produce justo debajo de la superficie. También se lo conoce como Interflujo.

Flujo superficial: Es el flujo más rápido que discurre hacia el cauce por la superficie del terreno, se presenta cuando el suelo se ha saturado por efectos como un evento de precipitación de alta intensidad.

La interpretación física es en función del modelo de reservorio lineal (Ver figura 3), donde el flujo de salida $b(t)$ es dependiente del flujo a la entrada $q(t)$ mediante la siguiente ecuación 14 (Willems, 2004).

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

Ecuación [14]

Usando la expresión algebraica:

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)$$

Ecuación [15]

La ecuación [14] puede ser simplificada con la ecuación [15], obteniendo así la ecuación siguiente:

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

Ecuación [16]

El parámetro k del modelo de reservorio lineal, es llamado “constante del reservorio” o “tiempo de recesión”.

El valor de la constante de recesión está relacionada con el “tiempo de concentración” del sistema a modelar, la misma está definida como el tiempo que necesita el agua para llegar a la salida, viajando desde el punto más lejano de la captación; es decir, que mientras más obstáculos presente el flujo o mayor sea la distancia del sistema será mayor el tiempo de concentración y también mayor el intervalo sobre el cual los valores de entrada pueden influenciar en las salidas del modelo (Willems, 2004).

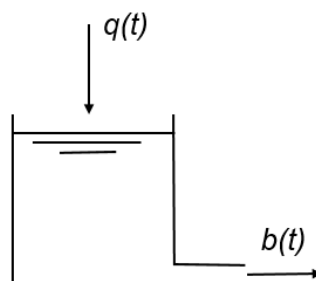


Figura 41. Series de entrada y salida de un modelo de reservorio lineal



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 no lineal, con pendientes de recesión constantes. Esto se conoce como recesión exponencial, ya que en esos períodos el caudal disminuye exponencialmente (Willems, 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).

El tiempo de recesión k es igual al tiempo en el que el flujo es reducido durante los periodos secos a la fracción $\exp(-1)=0,37$ de su descarga original. Para periodos con entrada $q(t)=0$ la salida del reservorio decrece de manera exponencial:

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

Ecuación [17]

Cuando la descarga a la salida es igual a $b(0)$ para un tiempo $t=0$, la descarga en el tiempo $t=k$ será igual a:

$$b(k) = \exp(-1)b(0)$$

Ecuación [18]

Debido a que parte de caudal se convertirá en caudal base, hay que emplear un factor de reducción w , (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.

Una vez separados los flujos conoceremos los flujos predominantes y la respuesta hidrológica del caudal a la precipitación en cada cuenca.

Al comparar los resultados de las dos cuencas se muestra la influencia de la cobertura vegetal, determinando el estado de impacto ambiental en cada una.

9.21. Fotografías de los efectos en la ciudad de Cuenca de los eventos extremos registrados en la cuenca Yanuncay.



Figura 42. Fotografías de los efectos en la ciudad de Cuenca de los eventos extremos registrados en la cuenca Yanuncay

9.22. Análisis de Turbiedad en las dos cuencas analizadas basado en el estudio “Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) Expost del Sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca en su etapa de operación y mantenimiento” (Piedra, 2017).

A continuación se presentan las tablas (57 y 58) de resultados del estudio Expost de Impacto Ambiental sobre las Plantas de Agua de Sustag correspondiente a la descarga final del río Yanuncay, analizados en el



laboratorio ALS ECUADOR – Acreditación NO. OAE LE 2C 05-005. Cuyo lugar de análisis es en CORPLABEC S.A. / Quito - Rigoberto Heredia OE6 - 157 y Huachi.

Tabla 57. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Detalle del punto de muestreo – Descargar Final Sustag

| CALIDAD DE AGUA PLANTA SUSTAG CÓDIGO MUESTREO A1 | |
|---|---|
| Ubicación de la muestra | Coordenadas UTM, WGS84: 17,0706079; 9674496 +- 6m |
| Dirección del proyecto | Vía SOLDADOS -Cuenca |
| Consideración de uso del agua | Desgarga final |
| Laboratorio acreditado | ALS ECUADOR - Acreditación N° OAE LE 2C 05-005 |
| Procedimiento muestreo | POS-04.00 "Muestreo de aguas", SM 1060 A, B y C |
| Fecha y hora de recepción de muestras | Agosto 19, del 2016 / 11H51 N° De Cadena de custodia: 0014376 |
| Lugar de análisis | CORPLABEC S.A. / Quito - Rigoberto Heredia OE6-157 y Huachi |
| Fecha de análisis | Agosto 19 al 5 de septiembre de 2016 |
| Fecha de muestreo | Agosto 17 del 2016 |
| Normativa utilizada para interpretación de resultados | Acuerdo Ministerial N° 097-A. TULSMA, Anexo 1, Norma de calidad ambiental de descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público |

Fuente: Informe de Monitoreo ALS ECUADOR (Piedra, 2017)

Elaboración: Equipo Consultor 2016

Tabla 58. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Evaluación de parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad

| CALIDAD DE AGUA PLANTA SUSTAG (Zona de estudio Yanuncay) | | | | |
|---|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Evaluación de parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad. | | | | |
| Parámetros Analizados | Unidad | Resultado | Límite permisible | Criterio de resultados |
| Potencial Hidrógeno | UpH | 6,67 | 6-9. | Cumple Normativa |
| Cloro Libre | mg/l | < 0,50 | 0,5 | Cumple Normativa |
| Temperatura | ° C | 15,4 | < 40,0 | Cumple Normativa |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/l | 18 | 220 | Cumple Normativa |
| Cianuro Total | mg/l | < 0,010 | 1 | Cumple Normativa |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/l | 5,69 | 250 | Cumple Normativa |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/l | 16,6 | 500 | Cumple Normativa |
| Hidrocarburos totales de petróleo | mg/l | < 0,15 | 20 | Cumple Normativa |
| Tensoactivos | mg/l | < 0,10 | 2 | Cumple Normativa |
| Aluminio | mg/l | 0,66 | 5 | Cumple Normativa |
| Arsénico | mg/l | < 0,010 | 0,1 | Cumple Normativa |
| Hierro | mg/l | 1,1 | 25 | Cumple Normativa |
| Manganeso | mg/l | 0,125 | 10 | Cumple Normativa |
| Zinc | mg/l | < 0,05 | 10 | Cumple Normativa |
| Sólidos Sedimentables | ml/l | < 0,5 | 20 | Cumple Normativa |
| Sólidos totales | mg/l | 96 | 1600 | Cumple Normativa |
| Sulfuros | mg/l | < 0,30 | 1.0 | Cumple Normativa |
| Sulfatos | mg/l | 10,2 | 400 | Cumple Normativa |
| Nitrógeno total | mg/l | 2,95 | 60 | Cumple Normativa |
| Cromo Hexavalente | mg/l | < 0,050 | 0,5 | Cumple Normativa |
| Fósforo | mg/l | < 1,00 | 15 | Cumple Normativa |
| Aceites y grasas | mg/l | < 0,20 | 70 | Cumple Normativa |
| Plomo | mg/l | < 0,10 | 0,5 | Cumple Normativa |

Fuente: Informe de Monitoreo ALS ECUADOR (Piedra, 2017)

Elaboración: Equipo Consultor 2016



A continuación se presentan las tablas (59 y 60) de resultados del estudio Expost de Impacto Ambiental sobre las Plantas de Agua El Cebollar correspondiente a la descarga final del río Tomebamba, analizados en el laboratorio ALS ECUADOR – Acreditación NO. OAE LE 2C 05-005. Cuyo lugar de análisis es en CORPLABEC S.A. / Quito - Rigoberto Heredia OE6 - 157 y Huachi.

Tabla 59. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Detalle del punto de muestreo – Descargar Final Cebollar

| CALIDAD DE AGUA PLANTA CEBOLLAR CÓDIGO MUESTREO A1 | |
|---|--|
| Ubicación de la muestra | Coordenadas UTM, WGS84: 17m 00720181; 9680774 ± 5m |
| Dirección del proyecto | Vía al Cebollar / Cuenca |
| Consideración de uso del agua | Descarga Final |
| Laboratorio acreditado | ALS ECUADOR - Acreditación NO. OAE LE 2C 05-005 |
| Procedimiento muestreo: | POS-04.00 "Muestreo de Aguas", SM 1060 A, B y C. |
| Fecha y hora de recepción de muestras: | Agosto 22, del 2016 / 09:01 No. De cadena de custodia: 0014377 |
| Lugar de análisis | CORPLABEC S.A. / Quito - Rigoberto Heredia OE6-157 y Huachi |
| Fecha de análisis | Agosto 22 al 7 de septiembre de 2016 |
| Fecha de muestreo | Agosto 18 del 2016 |
| Normativa utilizada para interpretación resultados | Acuerdo Ministerial No. 097-A. TULSMA, Anexo 1, Norma de calidad ambiental de descarga de efluentes al recurso agua. Tabla 8. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público |

Fuente: Informe de Monitoreo ALS ECUADOR

Elaboración: Equipo Consultor 2016

Tabla 60. Estudio de impacto ambiental cuya fuente es el informe de Monitoreo ALS ECUADOR. Evaluación de Parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad - Descarga Final Cebollar

| CALIDAD DE AGUA PLANTA CEBOLLAR (Zona de estudio Tomebamba) | | | | |
|---|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Evaluación de parámetros de acuerdo a la normativa ambiental aplicable y características de la actividad. | | | | |
| Parámetros Analizados | Unidad | Resultado | Límite permisible | Criterio de resultados |
| Potencial Hidrógeno | UpH | 6,72 | 6-9. | Cumple Normativa |
| Temperatura | ° C | 14,5 | < 40,0 | Cumple Normativa |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/l | 116 | 220 | Cumple Normativa |
| Cianuro Total | mg/l | < 0,010 | 1 | Cumple Normativa |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/l | 11,6 | 250 | Cumple Normativa |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/l | 36 | 500 | Cumple Normativa |
| Hidrocarburos totales de petróleo | mg/l | < 0,15 | 20 | Cumple Normativa |
| Tensoactivos | mg/l | < 0,100 | 2 | Cumple Normativa |
| Aluminio | mg/l | 8,63 | 5 | No cumple |
| Arsénico | mg/l | < 0,010 | 0,1 | Cumple Normativa |
| Hierro | mg/l | 1,31 | 25 | Cumple Normativa |
| Manganeso | mg/l | 0,063 | 10 | Cumple Normativa |
| Plomo | mg/l | < 0,10 | 0,5 | Cumple Normativa |
| Zinc | mg/l | < 0,05 | 10 | Cumple Normativa |
| Sólidos Sedimentables | ml/l | 8 | 20 | Cumple Normativa |
| Sólidos totales | mg/l | 178 | 1600 | Cumple Normativa |
| Sulfuros | mg/l | < 30 | 1 | Cumple Normativa |
| Sulfatos | mg/l | 15,8 | 400 | Cumple Normativa |
| Nitrógeno total | mg/l | < 1,25 | 60 | Cumple Normativa |

Fuente: Informe de Monitoreo ALS ECUADOR (Piedra, 2017)

Elaboración: Equipo Consultor 2016

A continuación se presenta la figura 43, sobre un mapa de ubicación de las Plantas de Agua de Sustag y El Cebollar.

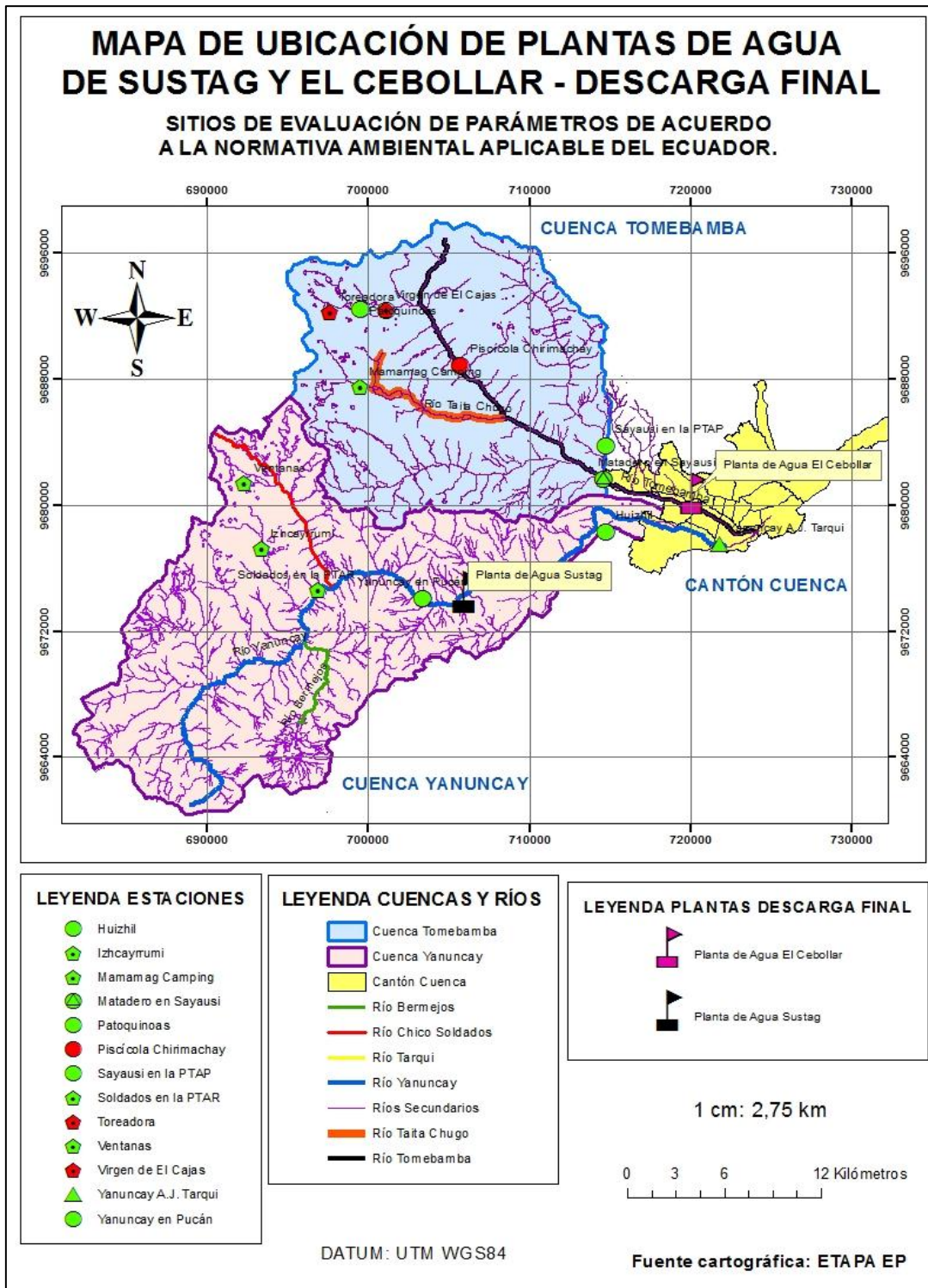


Figura 43. Mapa de ubicación de las Plantas de Agua de Sustag y El Cebollar. Modificación cartográfica: Autores