

**“MODELO INTEGRADO DE CAMBIO CLIMÁTICO  
Y RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RIO  
ESMERALDAS, PROVINCIA DE ESMERALDAS –  
ECUADOR”**

**"INTEGRATED MODEL OF CLIMATE CHANGE  
AND WATER RESOURCES IN ESMERALDAS  
RIVER BASIN, PROVINCE OF ESMERALDAS -  
ECUADOR"**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D. Rumiñahui Quindi Pichasaca**

**Dirigido por:**

**Dr.: Juan Antonio Pascual Aguilar (Instituto IMDEA Agua)**

Alcalá de Henares, a 12 de agosto de 2020

D. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR (Instituto IMDEA Agua)

**CERTIFICA:**

Que el trabajo titulado: **MODELO INTEGRADO DE CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RIO ESMERALDAS, PROVINCIA DE ESMERALDAS - ECUADOR**, ha sido realizado bajo mi dirección por el alumno/a D. Rumiñahui Quindi Pichasaca. Alcalá de Henares, a 12 de agosto de 2020

JUAN  
ANTONIO|  
PASCUAL|  
AGUILAR



Firmado digitalmente  
por JUAN ANTONIO|  
PASCUAL|AGUILAR  
Fecha: 2020.08.20  
12:47:40 +02'00'

Firmado: Juan Antonio Pascual Aguiar

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento especial a mi familia que ha sabido sostenerme y motivarme para la conclusión de este reto y sobremanera a mis colegas de trabajo PROTOS EC, que me han permitido liberarme de mis responsabilidades cotidianas para cumplir con mis metas académicas y apoyar con materiales de investigaciones similares y documentos de consulta para conseguir información valiosa para el desarrollo de la investigación.

A cada uno de los profesores que ha formado parte de mi aprendizaje en este Master, agradecer por su entrega y colaboración total con toda su experiencia y profesionalismo.

## ÍNDICE

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 2.     | JUSTIFICACIÓN.....  | 2  |
| 3.     | OBJETIVOS.....  | 2  |
| 3.1.   | Objetivo General.....   | 2  |
| 3.2.   | Objetivos Específicos.....  | 2  |
| 4.     | METODOLOGÍA.....  | 2  |
| 4.1.   | Zona de estudio.....  | 2  |
| 4.2.   | Descripción general de la cuenca.....   | 3  |
| 4.3.   | Características físicas de la cuenca.....                                     | 5  |
| 4.4.   | Características hidroclimáticas de la cuenca.....                             | 7  |
| 4.5.   | Base de datos.....  | 9  |
| 4.6.   | Modelación Hidrológica.....   | 13 |
| 4.7.   | Hydro-BID.....  | 13 |
| 4.7.1. | Datos de entrada y Base de datos de hidrología analítica.....                 | 14 |
| 4.7.2. | Modelo de Lluvia - Escorrentía de Hydro-BID.....                              | 15 |
| 4.7.3. | Calibración del modelo.....   | 17 |
| 4.8.   | Modelo de asignación de recursos hídricos.....                                | 19 |
| 4.8.1. | Datos de entrada.....   | 19 |
| 4.8.2. | Escenarios y términos.....  | 21 |
| 4.9.   | Estimación de la oferta hídrica.....  | 23 |
| 4.9.1. | Procesamiento y Definición de la cuenca.....                                  | 23 |
| 4.9.2. | Determinación y tratamiento de los datos de entrada.....                      | 23 |
| 5.     | RESULTADOS.....   | 25 |
| 5.1.   | Calibración y validación del modelo Hydro-BID.....                            | 25 |
| 5.2.   | Análisis de cambio climático.....   | 25 |
| 5.3.   | Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático (CC).....          | 26 |
| 5.4.   | Determinación de la demanda de agua actual y futura.....                      | 26 |
| 5.5.   | Obtención de la oferta hídrica.....   | 32 |
| 5.5.1. | Adecuación de los datos de entrada.....                                       | 32 |
| 5.5.2. | Calibración y validación del modelo Hydro-BID.....                            | 33 |
| 5.5.3. | Análisis de cambio climático.....   | 38 |
| 5.6.   | Modelación hidrológica bajo los escenarios de cambio climático en Hydro-BID41 |    |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.7.   | Análisis de balance entre la oferta – demanda hídrica según escenarios..... | 43 |
| 5.7.1. | Escenario I.....  | 43 |
| 5.7.2. | Escenario II.....   | 46 |
| 6.     | DISCUSIÓN.....  | 49 |
| 7.     | CONCLUSIONES.....   | 50 |
| 8.     | BIBLIOGRAFÍA.....   | 52 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros de forma y características morfométricas de la cuenca .....                       | 5  |
| Tabla 2. Escenarios de cambio climático formulados por el IPCC .....                                  | 11 |
| Tabla 3 El modelo lluvia-escorrentía GWLF y sus ecuaciones .....                                      | 16 |
| Tabla 4. Parámetros de calibración de Hydro-BID .....   | 17 |
| Tabla 5. Distribución de usuarios de agua por cuenca y subcuenca .....                                | 20 |
| Tabla 6. Distribución de las áreas de riego por cuenca y subcuenca .....                              | 20 |
| Tabla 7. Datos de entrada del modelo .....  | 24 |
| Tabla 8. Cálculo de demanda de agua según su uso.....   | 28 |
| Tabla 9. Cálculo de demanda de agua de uso industrial .....   | 29 |
| Tabla 10. Puntos de demanda de la cuenca del río Esmeraldas (hm <sup>3</sup> ).....                   | 31 |
| Tabla 11 . Parámetros de calibración de la Cuenca de Esmeraldas y Subcuenca del Guayllabamba.....     | 33 |
| Tabla 12. Métricas de desempeño diarias por subcuenca.....  | 34 |
| Tabla 13. Clasificación de 15 GCM según métricas seleccionadas .....                                  | 38 |
| Tabla 14. Listado de modelos seleccionados para la tercera comunicación nacional .....                | 39 |
| Tabla 15. Anomalía de la temperatura media por regiones, proyectado por los 4 escenarios RCP.....     | 39 |
| Tabla 16. Cambio porcentual (%) de la precipitación por regiones proyectado por los 4 escenarios..... | 40 |
| Tabla 17. Análisis Oferta – Demanda, escenarios 1 .....   | 45 |
| Tabla 18. Análisis Oferta – Demanda, escenarios II .....  | 48 |

## ÍNDICE DE MAPAS

|   |    |
|---|----|
| Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio, WGS 84 .....   | 3  |
| Mapa 2. Mapa de pendientes zona de la zona estudio, WGS 84 .....                                | 7  |
| Mapa 3. Mapa de precipitaciones de la zona de estudio, WGS 84 .....                             | 8  |
| Mapa 4. Mapa de temperaturas de la zona de estudio, WGS 84.....                                 | 9  |
| Mapa 5. Mapa de ubicación de estaciones Meteorológicas e hidrológicas del estudio, WGS 84 ..... | 13 |

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

DH: Demarcación Hidrográfica

RCP: *Representative Concentration Pathway*

REA: *Reliability Ensemble Averaging*

GIRH: Gestión Integrada de Recursos Hídricos

CISPDR: *Changjiang Institute Of Survey, Planing, Design And Research*

UPA: Unidades Productivas Agropecuarias

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

IEM: Información Estadística Mensual, Banco Central del Ecuador

SENPLADES: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo

## **RESUMEN**

La presente investigación muestra efectos de la aplicación de un modelo hidrológico en la cuenca del río Esmeraldas, de la demarcación hidrográfica de Esmeraldas, provincia del mismo nombre. El final que se persigue es la determinación de los efectos del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico y de la demanda de agua relacionadas en toda la cuenca de aporte. Para esto se han usado dos herramientas de modelación hidrológicas, que permiten obtener las series de caudales para la actualidad y estimaciones para el futuro usando los escenarios de cambio climático RCP 8.5 (no deseado) y RCP 2.5 (ideal), los resultados de las proyecciones climáticas fueron obtenidas del informe de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático del Ecuador, en el mencionado estudio las series generadas fueron realizadas con el método de ensamble REA. En primera instancia se ha logrado obtener el resultado de la oferta del agua por medio de la modelación ofrecida de la herramienta Hydro-BID, luego se hace un análisis del Plan Hidrológico realizado por Changjiang Institute Of Survey, Planing, Design And Research (CISPDR), desde la mirada de los efectos del cambio climático, lo cual permite validar las medidas estructurales propuestas por la consultora con la finalidad de mejorar la gestión del recurso hídrico de la cuenca. Los escenarios RCP confirman la necesidad de equilibrar la distribución espacio temporal de los incrementos de usos de agua en los sectores prioritarios como es agua potable, riego agrícola e industrias en general, en el horizonte de planificación y posiblemente hasta el año 2100, se confirma la estacionalidad del déficit, se prevé la construcción de embalses y transferencia de agua desde otras cuencas para lograr disminuir el déficit hídrico respecto a la creciente demanda versus el suministro de agua.

**Palabras clave:** Cuenca del Río Esmeraldas, Hydro-BID, Cambio Climático.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un tema que se ha vuelto muy común dentro de los intereses del mundo es la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), que intenta apuntar un desarrollo sostenible, el objetivo común de la gestión es promover una planificación y manejo del agua para garantizar que el líquido vital esté al alcance de todos, para los que estamos ahora y para los que vienen; para la conservación del recurso hídrico, para generar herramientas adecuadas que permitan a los tomadores de decisiones resolver problemas respecto al acceso universal del agua.

Los problemas de escasez y mala distribución del agua dulce son eminentes, al saber que el 60% de este recurso se encuentra distribuida en tan solo 9 países y aproximadamente 300 millones de personas viven en zonas con condiciones complejas de déficit hídrico. Las consecuencias negativas del cambio climático sobre la distribución espacial y temporal son reales, el acelerado crecimiento de la población hace aún más complejo el panorama incierto. Según informe del Banco Mundial, el gasto de agua en el mundo se incrementará alrededor del 40% hasta el 2035 y la según la ONU la población aumentará a 9.700 millones para el 2050 y 11.000 millón para el 2100, por tal razón el agua se ha considerado un recursopreciado en este siglo. Para evitar conflictos entre los distintos usuarios, es necesario generar políticas públicas en todos los países para la gestión sostenible del recurso, de esta manera garantizar el derecho humano al acceso de agua potable y saneamiento en el planeta.

La presente investigación implementa la herramienta Hydro-BID para la modelación hidrológica del río Esmeraldas, para el clima actual y para proyecciones climáticas futuras, y luego se realiza la estimación de las demandas insatisfechas y de esta manera valorar las medidas de amortiguamiento del Cambio Climático en la Cuenca Hidrográfica de Esmeraldas.

Para Ecuador, “el tema de agua no es tan solo un recurso, más bien se considera como un asunto estratégico crucial para la economía nacional, el desarrollo social sostenible y de estabilidad política de largo plazo” (CISPDR, 2016). Como primeros acuerdos se tiene establecido la gestión del recurso por unidades hidrográficas y no por la división política del país, para esto en Ecuador se estableció 5 niveles de gestión, de una zonificación mayor a menor, se tienen: 2 regiones hidrográficas de nivel 1, 4 Unidades Hidrográficas de nivel 2, 18 Unidades Hidrográficas de nivel 3, 123 Unidades Hidrográficas de nivel 4, y 734 unidades hidrográficas de nivel 5. La cuenca del río Esmeraldas es la más grande de las 5

cuencas de la Demarcación Hidrográfica (DH) de Esmeraldas, ubicada en la zona noroeste del país, en la región costanera del pacífico.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

En la cuenca de Esmeraldas hasta el momento se desconoce los efectos reales acerca de la disponibilidad del recurso agua, efectos causados ya sea por el cambio climático, aumento de la población y por cambio del uso del suelo; por tal razón es importante generar datos y proponer herramientas tecnológicas que ayuden a mejorar la gestión del agua en una zona con déficit de información meteorológica e hidrológica como es la cuenca de río Esmeraldas.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1. Objetivo General**

Realizar el análisis de la Oferta y Demanda de agua en la Cuenca del Río Esmeraldas en situaciones actuales y bajo escenarios de cambio climático.

### **3.2. Objetivos Específicos**

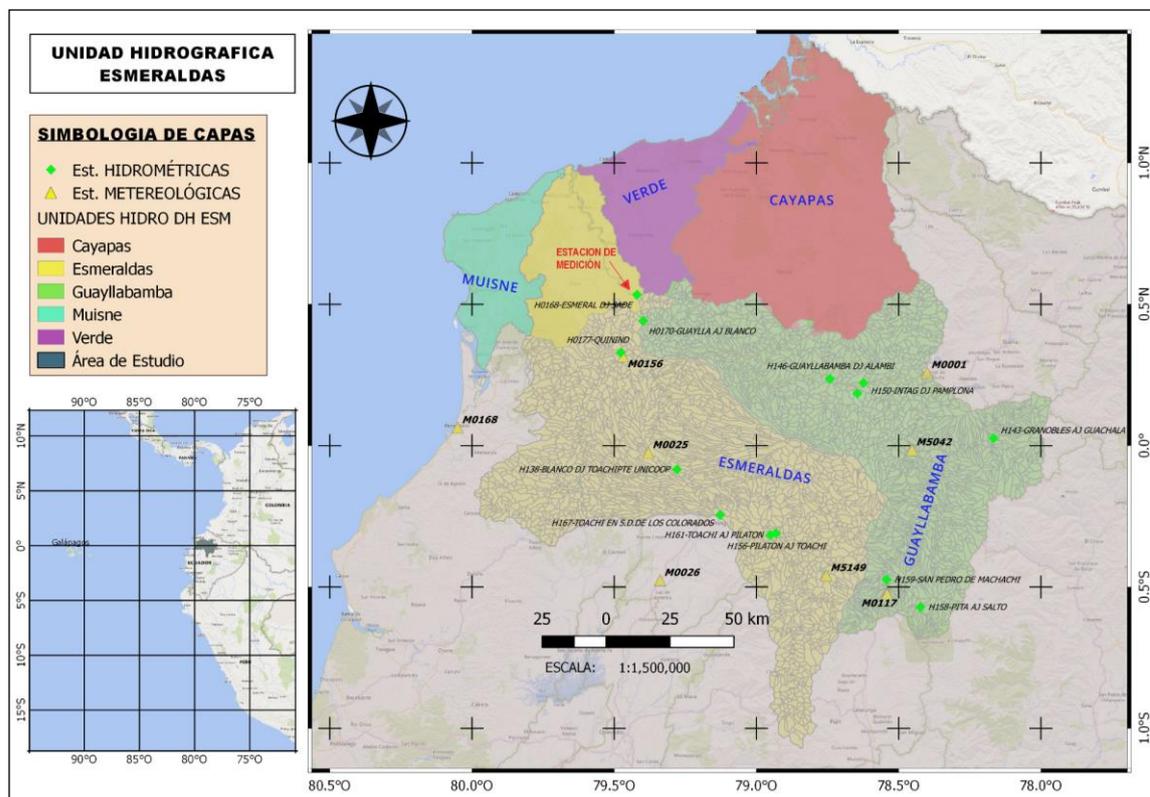
- Valorar la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Esmeraldas bajo escenarios de Cambio Climático utilizando herramientas de modelación hidrológica como Hydro-BID. Los períodos de tiempo para la evaluación son desde la presente fecha hasta 2040, 2041 a 2070 y 2071 hasta 2100.
- Calcular la cantidad de agua necesaria en el futuro para los diferentes tipos de consumidores de la cuenca según el orden de prelación establecida por la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA).
- Analizar el déficit hídrico de la cuenca de Esmeraldas con enfoque de cambio climático, según los resultados obtenidos en el Plan Hídrico de la Demarcación Hidrográfica de Esmeraldas realizado por CIPDR, 2016.
- Proponer medidas de acomodo al cambio climático en la cuenca de estudio, según la cantidad de agua disponible en el futuro.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Zona de estudio**

La zona de estudio se encuentra en las coordenadas 79.0°O y 0.0° sobre la costa occidental (Mapa 1). Sus límites son al Norte con las cuencas de Río Verde, Muisne, Cayapas y Mira, al Este con la DH Mira y Napo, al Sur con DH Pastaza y Guayas y al Oeste con DH Manabí.

Comprende parte de cada una de las siguientes provincias: Esmeraldas, Manabí, Santo Domingo, Pichincha, Imbabura y Cotopaxi. Las cuencas que forman parte del área de estudio son la Guayllabamba (color verde), en donde se encuentra la estación hidrométrica codificada con COMID 302925001 según la base de datos de Hydro-BID y Esmeraldas (color amarillo), que de la misma forma contiene a la estación hidrométrica identificada con el COMID 302861037. Las Cuencas como Cayapas, Rio Verde y Muisne poseen áreas de drenaje totalmente independientes, por esta razón en el presente estudio se limita al análisis de las dos cuencas en específico. La zona el estudio no abarca toda la cuenca de Esmeraldas debido a que la estación hidrométrica H0168 (estación de medición) del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), está ubicada a 66.65 Km aguas arriba de la salida de mencionada cuenca. De esta manera no abarca a los cantones de Esmeraldas y una parte baja del cantón Quinindé, pero es necesario aclarar que se pueden catalogar como de usuarios directos del afluente de la cuenca de estudio.



#### 4.2. Descripción general de la cuenca

El área total de drenaje es 19665,10 Km<sup>2</sup>, de los cuales la cuenca del río Esmeraldas ocupa el 53,31% del área de estudio, con 10483,25 Km<sup>2</sup> y Guayllabamba ocupa el 46,69% del área

de estudio con 9181,85 Km<sup>2</sup>. Los puntos más altos se ubican en la cordillera de los andes con la cota máxima de 4100 m.s.n.m. El Río Esmeraldas desemboca en el Pacífico, pero la cota mínima donde se encuentra la estación hidrométrica corresponde a 120 m.s.n.m aproximadamente, ubicada dentro del cantón Quinindé.

Según el Censo de 2010 del INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador), la zona de estudio abarca una población aproximada de 3088736 habitantes. Las actividades económicas de mayor trascendencia de la población que se encuentra dentro de la DH Esmeraldas son la agricultura, ganadería, refinación del petróleo y la industria del turismo. La actividad que ha tenido mayor soporte es la agricultura-ganadera, otra de las actividades según CISPDR, que ha mejorado es la industria del turismo conjuntamente con las demás industrias. Los principales productos de exportación de la demarcación hidrográfica son plátanos, cacao y palma aceitera, maíz, trigo, hortalizas y papas; de la misma forma existe grandes extensiones de pastos y recursos forestales. Esta variedad de productos es debido a que el área de estudio abarca tanto a la zona costanera como a la sierra ecuatoriana. De acuerdo con el tercer Censo Nacional de Agricultura elaborado en el año 2000 por el INEC, las superficies relacionadas con la actividad agropecuaria son 1560180 ha conformada por 92559 Unidades Productivas Agropecuarias (UPAs), de estas la cuenca de Guayllabamba posee mayor número de UPAs a pesar de poseer menor número de áreas productoras agrícolas. Como principales industrias se cita la manufacturera, construcción, generación eléctrica, minería y la industria de servicios. Como datos importantes se tiene que en la DH Esmeraldas, las tres industrias con mayor generación del valor agregado (2010) son, en primer lugar, la industria manufacturera con USD 3623 millones, seguida por el comercio al por mayor y menor con USD 1894 millones y finalmente la industria de la construcción con USD 1371 millones. (Banco Central del Ecuador, 2017)

Para determinar el uso de suelo de la zona de estudio, se toma como referencia el Sistema de Información Geográfica (SIG) a escala 1:250000 del Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGAP 2015) correspondiente a la DH Esmeraldas, en donde, de mayor a menor porcentaje se tiene que las tierras forestales ocupan 817074 ha que corresponde al 41.55%, pastizales ocupan 469637 ha corresponde el 23.88%, Tierras cultivadas 460915 ha (23.44%), otras tierras 186266 ha (9.47%), suelo urbano 19541 ha (0.99%) y finalmente cuerpos de agua ocupan 13075 ha (0.66%).

### 4.3. Características físicas de la cuenca

Con la finalidad de establecer las principales características de la cuenca se procede a calcular los parámetros morfológicos y físicos del área de estudio, es importante esta caracterización pues es lo que condiciona su comportamiento a eventos climáticos extremos. Las medidas estudiadas se observan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Parámetros de forma y características morfométricas de la cuenca  
Elaboración propia

| PARÁMETROS MORFOMÉTRICAS GENERALES                              |         |          |  |
|---|---------|----------|--|
| Parámetro   | Símbolo | Valor    |  |
| Perímetro (km)  | P       | 983.50   |  |
| Área (Km <sup>2</sup> )   | A       | 19665.10 |  |
| Longitud máxima (Km)  | LM      | 176.51   |  |
| Longitud de cauce principal (Km)                                | LCP     | 228.55   |  |
| Ancho de Cuenca   | AC      | 111.41   |  |
| Desnivel altitud (m)  | DA      | 3996.25  |  |
| PARÁMETROS MORFOMÉTRICAS RELACIONADOS CON LA FORMA DE LA CUENCA |         |          |  |
| Parámetro   | Símbolo | Valor    | Observación                            |
| Factor forma  | FF      | 0.631    | Ensanchada                             |
| Coeficiente de compacidad                                       | Kc      | 1.964    | Oval-oblonga a rectangular-<br>Oblonga |
| Coeficiente de circularidad                                     | CC      | 0.255    | Alargada                               |

La cuenca de estudio posee una amplia variación altitudinal, ya que la salida de la cuenca posee una cota de 117,50 m.s.n.m y la cota más alta de la cuenca llega hasta 4113,75 msnm. Respecto al cauce principal existe dos ríos de orden 4 como es el de Guayllabamba y el río Blanco, pero el que tienen mayor longitud es el primero con una longitud total 228,55 que nace desde una altura de 2525 m.s.n.m, pero los aportes a este río nacen sobre los 3990 m.s.n.m. Los dos ríos Guayllabamba y el Blanco forman el río de orden 5 que es el Esmeraldas, es decir, dos subcuencas Blanco y Guayllabamba forman la cuenca del Esmeraldas.

El mayor porcentaje de áreas corresponden a una altura promedio de 118 m.s.n.m, con un total del 31%, seguida por zonas con alturas promedio de 384 m.s.n.m con un 9% y áreas

con alturas promedio de 2782 m.s.n.m con 6% aproximadamente. El resto de los niveles están entre el 6, 5 y 4 %, que dan un total de 54%. Ver Gráfico 1.

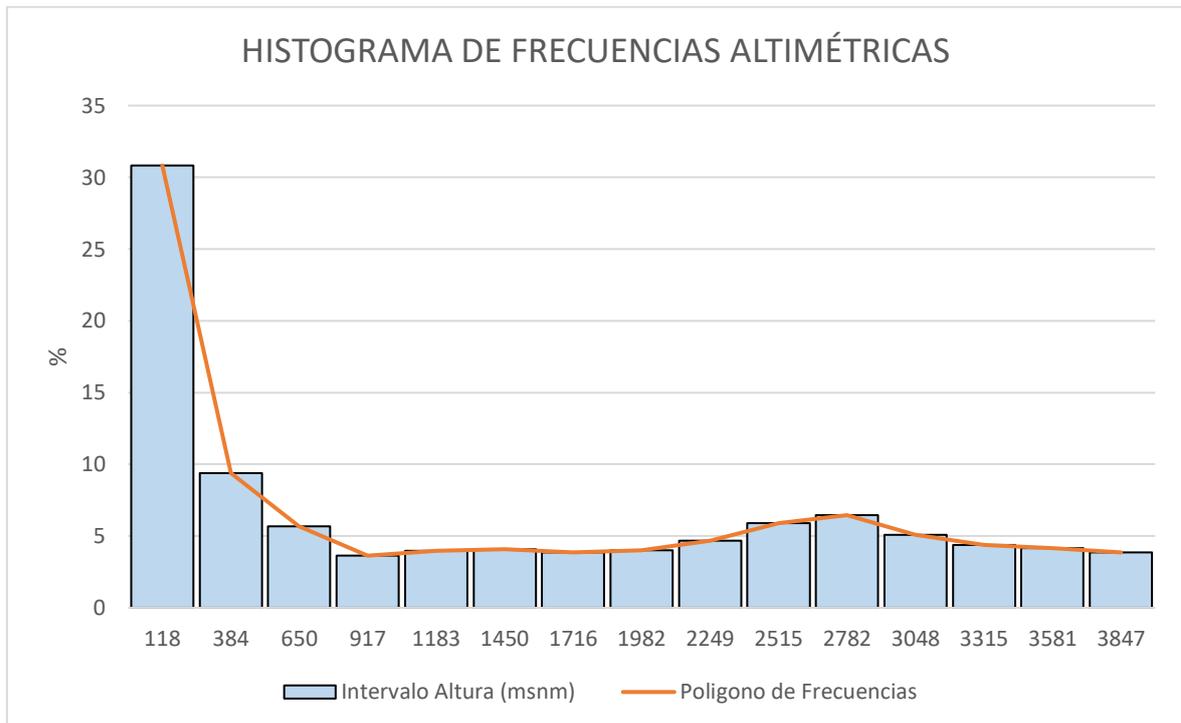
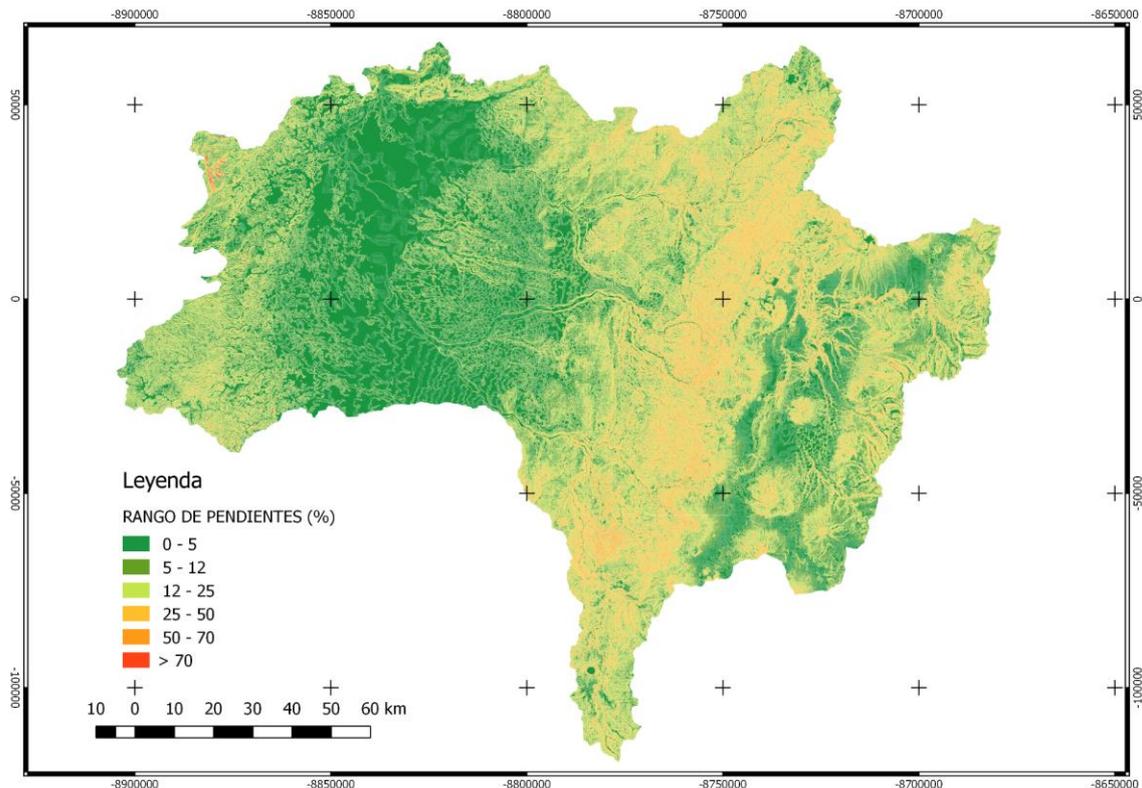


Gráfico 1. Histograma de frecuencias altimétricos de la zona de estudio  
Fuente: Armenta Porras, 2016

El porcentaje de pendiente promedio de la cuenca es 20% ( $\text{Altura} / \text{Base} * 100$ ), se puede observar en el Mapa 2 que el porcentaje de pendiente de mayor repetición es del 12%, la misma que se encuentra ubicada al noroeste de la cuenca y corresponde a una clasificación según SEMPLADES (2013) de suave o ligeramente inclinada; de la misma forma se tiene una importante área con porcentaje de pendiente del 25%, que son zonas consideradas con ondulación moderada que también queda en la parte baja de la cuenca. La parte de la cordillera andina posee pendientes entre 25% al 50%, que representa el 26 % del área total de la cuenca.



Mapa 2. Mapa de pendientes zona de la zona estudio, WGS 84

Elaboración propia

Fuente: CISPDR, 2016

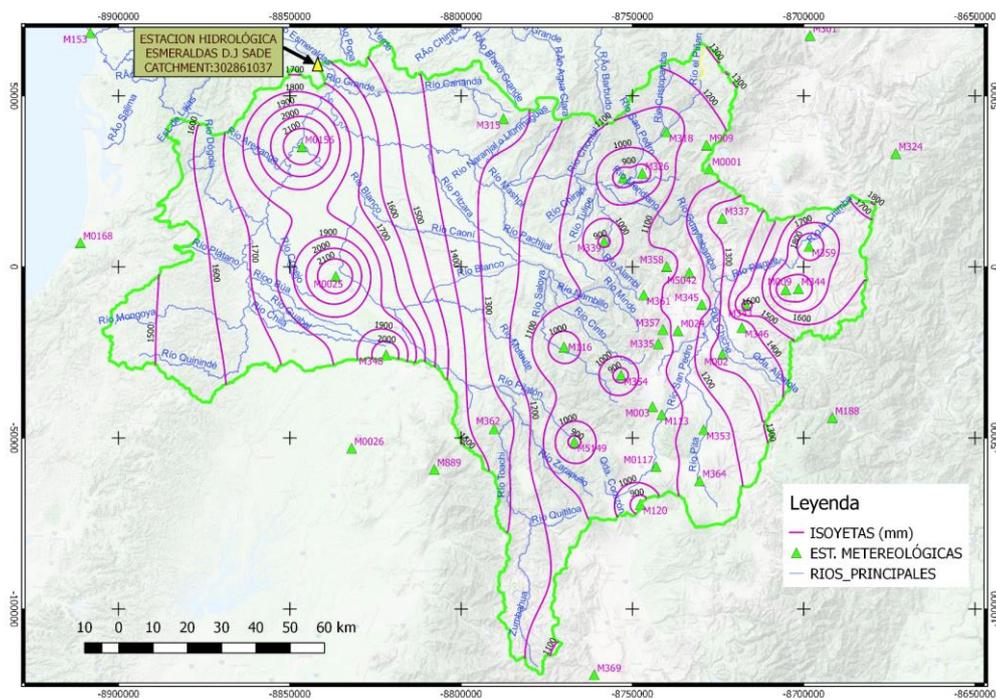
Analizando los parámetros de forma de la cuenca (Tabla 1) se puede catalogar como una cuenca ensanchada ( $FF= 0,631$ ). De la misma manera el coeficiente de compacidad de Gravelius  $Kc=1,964$  nos ayuda a caracterizar como una cuenca entre Oval-oblonga y rectangular-Oblonga, finalmente según el coeficiente de circularidad de Miller ( $CC=0,255$ ), lo que se puede señalar es que el comportamiento de las precipitaciones sea poco torrencial (Lux Carnoda, 2016). La densidad de drenaje de la cuenca es 0,53, lo que indica un suelo permeable y resistente a la erosión, con relieves suaves en especial la cuenca baja que tiene el mayor porcentaje de las áreas. Basándose en estos coeficientes se puede dar una idea del comportamiento de la cuenca frente a eventos climáticos extremos en especial a las crecidas, se sabe que no son del todo exactas, pero ayudan a entender de mejor manera las mencionadas ocurrencias, entonces, se puede concluir que se trata de una cuenca alargada mal drenada, propensa a eventos climáticos extremos.

#### 4.4. Características hidroclimáticas de la cuenca

La cuenca del estudio posee varios pisos climáticos, ya que comienza en las costas del Pacífico hasta llegar a las zonas altas de los andes, por tal razón su clima es afectado por

masas de aire provenientes del océano pacífico y vientos alisios del Amazonas. En el perfil costanero de la cuenca se tiene bosques lluviosos tropicales con altas temperaturas y lluvias casi todo el año, también se tiene planicies intermontañas con sus temperaturas altas y lluvias estacionales, en la denominada época lluviosa.

Las temperaturas medias anuales varían entre los 12°C a 26°C, las bajas temperaturas pertenecen a las zonas cercanas a la cordillera y las altas a la zona costanera. En los meses fríos las zonas altas llegan hasta una temperatura media mensual de 11.4°C y en la zona costanera hasta 25°C. En los mapas 3 y 4 se puede observar las variables hidroclimáticas que son datos básicos para la modelación hidrológica de la cuenca, en los mencionados mapas se muestra la interpolación de la variable precipitación y temperatura respectivamente.



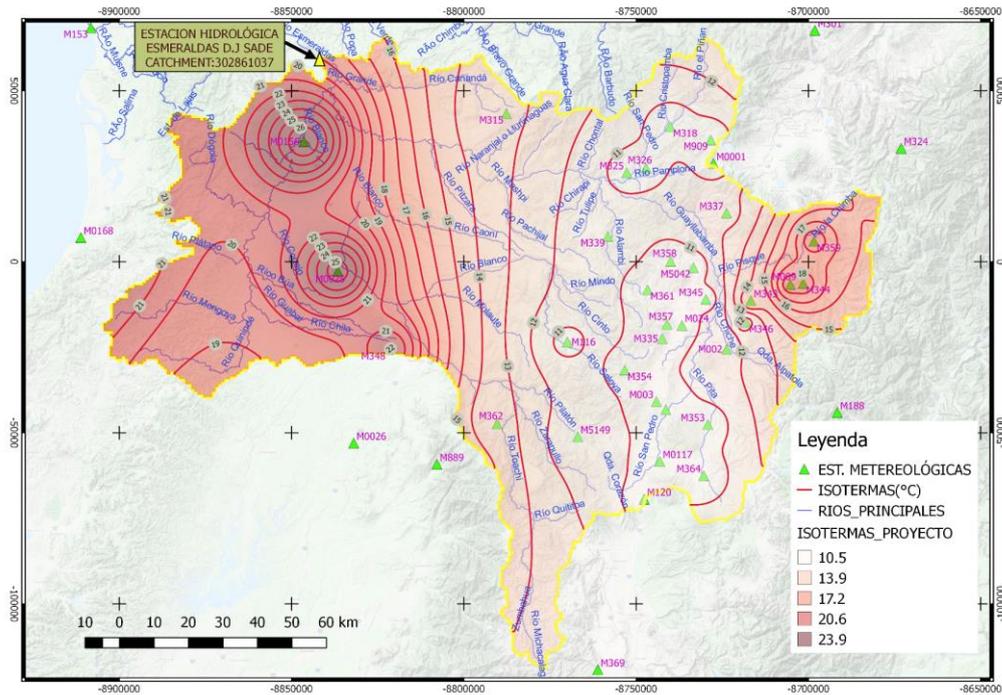
Mapa 3. Mapa de precipitaciones de la zona de estudio, WGS 84

Elaboración propia

Fuente: Armenta G. 2015

Las precipitaciones en toda la cuenca se distribuyen irregularmente, el periodo de meses más lluviosos corresponde de noviembre a abril o en su defecto de diciembre a mayo, registrándose como los meses de mayor precipitación en abril y mayo, pudiendo alcanzar el 15% de la precipitación anual. Los meses más secos se registran en julio y agosto, que apenas cubre el 2% de la precipitación del año. Se debe destacar que, en la occidente y céntrica de la cuenca de estudio, el comportamiento es totalmente diferente, ya que los meses más secos suele ser de diciembre a mayo. La precipitación media anual de la cuenca varía desde 600

mm en zonas menos lluviosas (sureste y noroeste) hasta los 2500 en las zonas con mayor pluviosidad (suroeste y noreste).



Mapa 4. Mapa de temperaturas de la zona de estudio, WGS 84

Elaboración propia

Fuente: Armenta G. 2015

#### 4.5. Base de datos

Una de los desafíos para fomentar el acceso y generar información con miras de dar solución a los problemas relacionados del agua, objetivo de la GIRH, es precisamente contar con información climática e hidrológica con series continuas y de calidad; sin embargo la necesidad de ofrecer apoyo e implementar herramientas y una serie de recursos para facilitar mayor análisis en el momento de tomar decisiones en la planificación y manejo del agua, hace que se recurra a el uso de modelos de circulación global (GMC), modelos estadísticos para datos faltantes o realizar proyecciones y una serie de modelos matemáticos relacionados con el estudio hidrológico de una cuenca.

Los escenarios de cambio climático que serán tomados en cuenta para esta zona de estudio son la RCP 2.6 y la RCP 8.5, estos escenarios fueron tomados en cuenta para el presente estudio, por la necesidad de estudiar los efectos del cambio climático por parte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Estos escenarios son

“descripciones coherentes, internamente consistentes y convincentes de un posible estado futuro del mundo” (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016). Los escenarios basados en modelos climáticos son desarrollados utilizando el proceso paralelo (Figura 1). Este proceso empieza con la caracterización de los escenarios climáticos y el forzamiento radiactivo hacia el 2100, definiendo el forzamiento radiactivo según los autores anteriormente mencionados, como un cambio impuesto en la radiación de la tierra; paralelamente se forman los escenarios de emisiones y socioeconómicos que conducirían hacia las caminos de forzamiento, seguidamente con los hallazgos anteriores se realiza el análisis de impacto, vulnerabilidad y adaptación respectivos, para posteriormente concluir con una retroalimentación entre todos los componentes de la metodología (2a, 2b y 3 del Gráfico 2) y los análisis, con el fin de poder realizar mejoras de los efectos obtenidos en cada una de las etapas (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016).

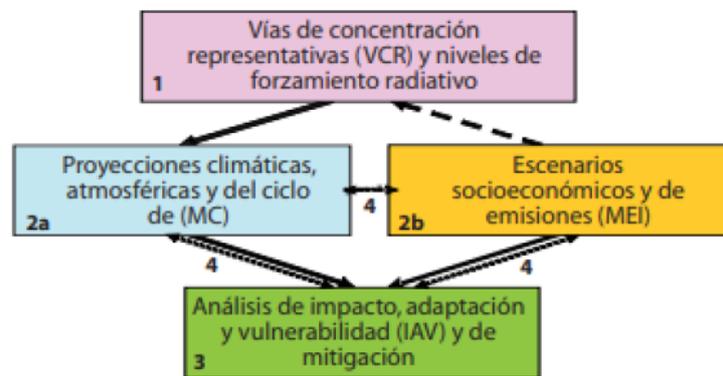


Gráfico 2. Metodologías de construcción de escenarios

Fuente: (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016)

La información sobre la concentración de los gases de efecto invernadero, la información sobre el uso de suelo y cobertura vegetal, son totalmente necesarios para hacer efectiva la aplicación de los modelos climáticos mencionados. Los escenarios específicos de emisiones son identificados por la comunidad científica como caminos plausibles hacia la consecución de cada línea de forzamiento, dichos escenarios son conocidos como “Caminos representativos de concentración”, RCPs, (Representative concentration pathway), en la que la palabra representativo nos indica que los RCP son una simple posibilidad de entre tantos escenarios que conducen a las características del mencionado forzamiento radiactivo. La palabra “camino” hace referencia insistente sobre la vía en que ha tomado tiempo para llegar al forzamiento y los niveles de concentración a largo plazo (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016). Cada tendencia evolutiva representa un cambio en el tiempo de la

demografía, componente socioeconómico, medioambiental y tecnológico, los mismos que suelen ser negativos o positivos (Tabla 2 y Gráfico 3).

Tabla 2. Escenarios de cambio climático formulados por el IPCC

Elaboración: Estudiante

Fuente: Armenta Porras, 2016

| Escenario | Forzamiento radiactivo   | Concentración  | Forma del itinerario                 | Anomalía de temperatura (°C) |
|-----------|--|--|--------------------------------------|------------------------------|
| RCP 8.5   | >8.5 W/m <sup>2</sup> en 2100                                      | > ~1370 CO <sub>2</sub> -eq en 2100                                    | En Aumento                           | 4.9                          |
| RCP 6     | Estabilización en ~6W/m <sup>2</sup> a partir de 2100              | ~850 CO <sub>2</sub> -eq (estabilización, a partir de 2010)            | Estabilización sin translimitaciones | 3                            |
| RCP 4.5   | Máximo a ~4.5W/m <sup>2</sup> a partir del 2100                    | ~650 CO <sub>2</sub> -eq (estabilización, a partir de 2010)            | Estabilización sin translimitaciones | 2.4                          |
| RCP 2.6   | Máximo a ~2.6W/m <sup>2</sup> Antes de 2100; disminución posterior | Máximo a ~490 CO <sub>2</sub> -eq antes de 2100; disminución posterior | Culminación seguida de disminución   | 1.5                          |

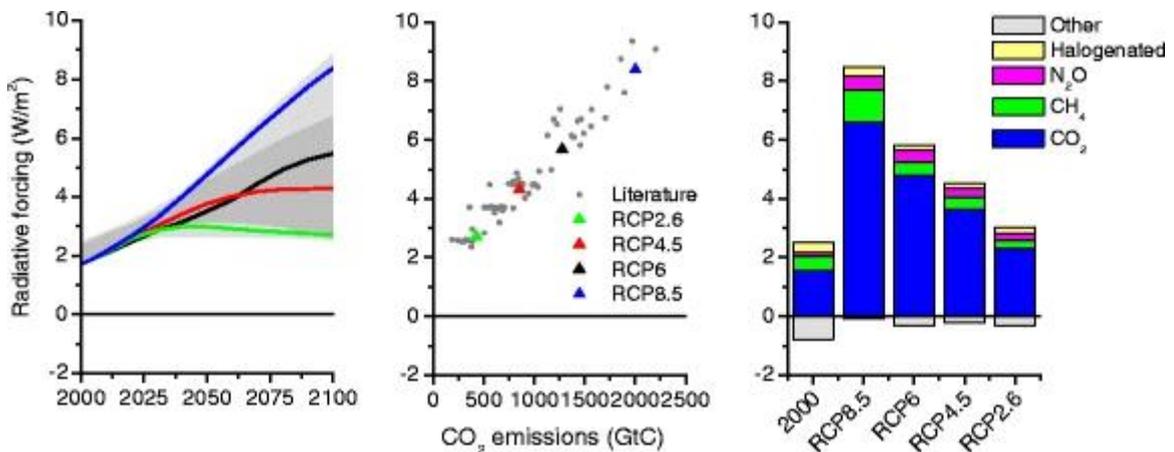
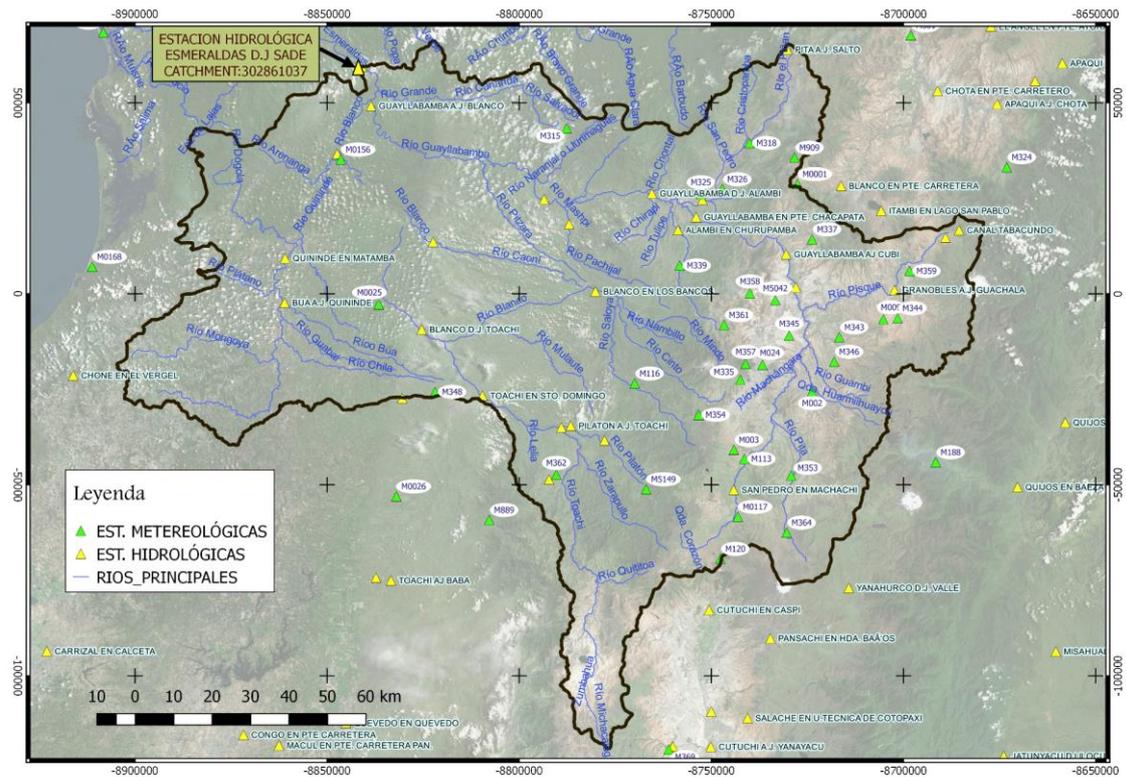


Gráfico 3. Forzamiento radiactivo (izquierda), emisión acumulada de CO<sub>2</sub> vs Forzamiento radiactivo (centro) y nivel de forzamiento por categoría de los RCP

Fuente: (Van Vuuren DP, 2011)

En el gráfico anterior, a la derecha, se tiene las tendencias del forzamiento radiactivo según los escenarios RCP en el ozono troposférico, donde se muestra una clara diferencia entre los RCP. Para RCP 8.5 hay un aumento en el forzamiento radiactivo y para RCP 4.5 y RCP 2.6 hay una disminución. El gráfico del medio representa la relación directa que existe en la acumulación del CO<sub>2</sub> con el forzamiento radiactivo a lo largo del siglo, en esta gráfica los puntos grises representan la cantidad de estudios existentes al respecto. Finalmente, el gráfico de la derecha representa el forzamiento radiactivo por categorías (gases de efecto invernadero), donde se ve claramente que el factor dominante es el CO<sub>2</sub>. El área gris de la gráfica de forzamiento radiactivo (izquierda) indica los percentiles 98 y 90 (gris claro / oscuro) de la literatura. El forzamiento es relativo a los valores preindustriales y no incluye el uso del suelo, el polvo o el forzamiento de aerosoles de nitrato.

Para obtención de los datos meteorológicos a primera instancia se trabajó mediante la aplicación de Modelos de Circulación Global (GCM), pero para el análisis de la cuenca, estos resultaron no adecuados por su escala, por lo cual fue necesario recurrir a métodos de reducción de escala para mejorar la determinación de la temperatura y precipitación, que son la información básica que usan los modelos hidrológicos para realizar las simulaciones respectivas. En esta ocasión se utilizó los datos obtenidos en la Tercera Comunicación Nacional del Ecuador, gestionados en lenguaje R. Como procedimiento primeramente se realiza una selección de 4 modelos con mejor representación del clima de la zona tropical, con estos modelos y con los datos mensuales de precipitación y temperatura media (estaciones INAMHI, Mapa 4), se realiza un procesamiento de datos de disminución de escala estadística, obteniendo series mensuales por cada modelo para el periodo de 1981-2005. Finalmente, con estos datos se obtiene la serie única de proyecciones para cada estación estudiada, esto mediante el método REA (Reability Ensemble Averaging). REA se basa en la capacidad del modelo en reproducir diferentes aspectos del clima presente (Armenta Porras, 2015).



Mapa 5. Mapa de ubicación de estaciones Meteorológicas e hidrológicas del estudio, WGS 84

Elaboración: Estudiante

Fuente: CISPDR. 2016

#### 4.6. Modelación Hidrológica

Al saber que un modelo es una simple aproximación a la realidad, que permite realizar análisis simplificado a escala sin necesidad de recurrir al medio real. En nuestro caso, el modelo hidrológico trata de representar el sistema complejo como es la cuenca de estudio. Esto con la finalidad de conocer de mejor manera la interacción de los diferentes elementos del ciclo hidrológico y la proyección de contextos hipotéticos de cambios, estos cambios que poseen sucesos posibles a lo largo del tiempo. Para su análisis es necesario definir entradas y salidas del sistema, conformadas por variables hidrológicas medibles, las mismas que se interaccionan como parte de un proceso de la cuenca de drenaje. Según Cabrera (2015), “(..)No existe el modelo perfecto aplicable a todas las cuencas del planeta: cada cuenca tiene condiciones muy particulares de clima, geografía, geología, etc. que incrementa la importancia de un proceso por sobre otros y condicionan la estructura del modelo”.

#### 4.7. Hydro-BID

Se trata de un modelo simbólico de tipo matemático, que según su planteamiento se puede definir como un modelo teórico; como la relación de entradas y salidas varían con el tiempo,

se puede catalogar como un modelo variable en el tiempo; el modelo considera también la diversidad espacial de manera intermedia, por lo que se puede definir como semi-distribuidas; y finalmente al no considerar la aleatoriedad en la formulación matemática de las entradas y salidas, se trata de un modelo determinístico (Pascual Aguilar & Díaz Martín, 2016).

Hydro-BID fue desarrollado con la finalidad de ayudar, entre otros temas, a mejorar la gestión del agua en los países miembros del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), tomando principal interés de las afectaciones que se tendrán en la accesibilidad del agua con el cambio climático. Se trata de un sistema integrado y cuantitativo con datos estructurados para la región de América Latina y El Caribe (ALC). Hydro-BID permite cuantificar y cualificar el agua de una cuenca, los requerimientos de infraestructura y como toda herramienta, proporciona información para tomadores de decisión que buscan mejorar la gestión del agua. El programa este compuesto por el módulo hidrológico y el módulo climático, los mismos que ayudan aproximar valores de caudal y volumen a escala local y regional. Las cuenca y subcuencas son las unidades de cálculo, en las que Hydro-BID tiene la capacidad de incorporar datos climáticos y datos de hidrología analítica, esto mediante la herramienta de interpolación que lo incorpora en cada subcuenca que conforma la zona de estudio, desde luego esto hace ideal para la aplicación en el Ecuador.

#### **4.7.1. Base de datos AHD y datos de entrada**

Para toda América Lanita y el Caribe, el BID ha logrado generar una base de datos de la hidrología analítica llamada AHD, esta base de datos puede ser administrada mediante un sistema de información geográfica (GIS) ya que los datos son de tipo vectorial. Esto permite crear redes de flujos a lo largo de toda una región sin ninguna discontinuidad debido a las fronteras de los países, donde cada subcuenca posee un código único de identificación. Lo descrito muestra la principal ventaja sobre otros softwares debido a la construcción de una base de datos regional, realizada con la finalidad de integración de estudios individuales en diferentes países latinos y caribeños, por lo tanto, ha permitido robustecer la red de modelos hidrológicos regionales.

Seguidamente se puede mencionar las principales particularidades de la base de datos mencionada:

- Los Causes principales y ríos principales y de orden inferior son representados por segmentos trazados en el interior de las cuencas.

- Mediante herramientas de exploración GIS es posible divisar el trazado que determinan los datos vectoriales de ríos tanto aguas abajo como aguas arriba de una cuenca y entre distintas cuencas.
- Es posible complementar datos locales y adjuntar atributos adicionales para cada modelación realizada en una zona específica.

Al disponer las elevaciones mínimas y máximas de cada zona de análisis, la base AHD permite localizar trazos fluviales de manera efectiva; de la misma manera incluye entre sus datos resididos los datos morfométricos de la cuenca o subcuenca, más la rapidez de flujo de la corriente que atraviesa cada cuenca. Un archivo SQLite forma parte de la base de datos, en el que se encuentra descrito el uso y el tipo de suelo; mientras que los datos meteorológicos como es la precipitación y temperatura son ingresados por el usuario para luego realizar una interpolación por cada subcuenca con la ayuda de Hydro-BID. Para la región del América del Sur se han determinado 193000 cuencas y fragmentos de ríos, con una resolución de 93Km<sup>2</sup> y los segmentos con longitudes aproximadas de 11 km.

#### **4.7.2. Modelo de Lluvia - Escorrentía de Hydro-BID**

Para generar los volúmenes de escorrentía, Hydro-BID emplea el modelo de lluvia-escorrentía llamado Factor de Cauces Generalizados- (GWLF), que es la que permite la incorporación de datos como uso y tipo de suelo tal como se describe en el Gráfico 4. Dentro de este cálculo se toman en cuenta el flujo base de la cuenca correspondiente al flujo de aguas subterráneas poco profundas. Los cálculos de escorrentía y flujo base se realiza por cuenca, lo que le forma la escorrentía es el exceso de infiltración, mientras que el flujo base se forma de la liberación gradual de los mantos saturados. (Fekadu, Miralles, & Muñoz Castillo, 2014).

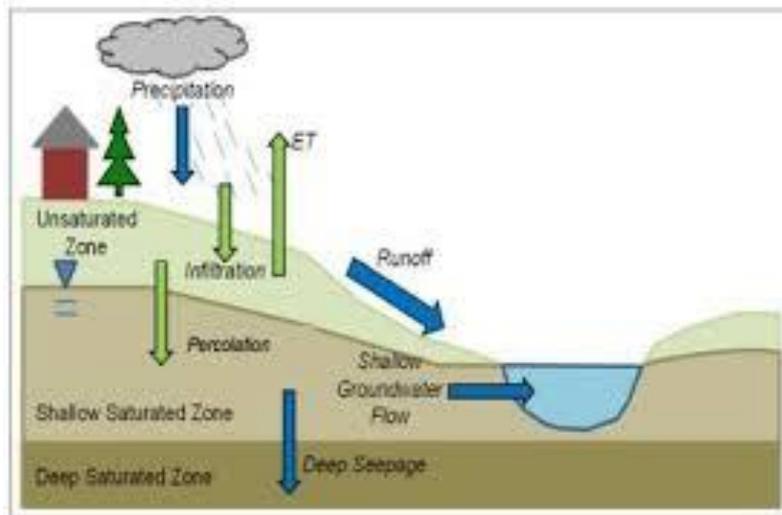


Gráfico 4. Representación del modelo GWLF.

Fuente: Fekadu, Miralles, & Muñoz Castillo, 2014

Es necesario precisar qué el modelo tiene en cuenta parámetros de deshielo; cantidad de agua máxima, teórica perdida desde el suelo; escorrentía, infiltración profunda y poco profunda; las ecuaciones que intervienen en el modelo pueden apreciarse en la Tabla 3:

Tabla 3 El modelo lluvia-escorrentía GWLF y sus ecuaciones

Fuente: Fekadu, Miralles, & Muñoz Castillo, 2014.

| Componente                                       | Ecuación   |
|--|--|
| <b>Deshielo</b>                                  | $SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mit}$ <p>SNO<sub>t</sub> : contenido de agua de la capa de nieve en un día dado<br/> R<sub>t</sub> : cantidad de precipitación en un día<br/> SNO<sub>mit</sub> : cantidad de deshielo</p>                             |
| <b>ETP potencial</b>                             | $PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_t}{T_t + 273}$ <p>H<sub>t</sub>: número de horas de luz solar por día durante el mes<br/> E<sub>t</sub>: presión de vapor de agua en saturación en mbar en el día t<br/> T<sub>t</sub>: temperatura en el día t (° C).</p> |
| <b>ETP ajustada al uso de suelos y cobertura</b> | $PET_{Adj(t)} = CV * PET$ <p>Donde PET<sub>Adj(t)</sub> es la ETP de cobertura ajustada, y CV es el factor de cobertura</p>  |

| Componente  | Ecuación   |
|-------------|--|
| Escurrentía | $RO_t = \left( \frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$ $D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$ ROt: escurrentía (cm)<br>Rt: suma de lluvia y deshielo<br>Dt: parámetro de detención<br>CNt: Número de curva asignado según el uso del suelo  |
| Percolación | $U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$ $S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$ Ut y St son las humedades del suelo de las zonas no saturada<br>Qt, Et, Pt, Gt y Dt son la escurrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo, y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm) |
| Flujo       | $F_t = RO_t + G_t$ Ft: suma de la escurrentía (ROt) y del flujo del agua subterránea (Gt)  |

Para simplificar el proceso de deshielo se considera que el agua que procede de ésta se considere como lluvia. Las variables como temperatura diaria y número de horas luz, son bases de cálculo de la evapotranspiración potencial en el GWLF, que finalmente los valores resultantes deben ser corregidos según el uso y cobertura del suelo. El cálculo de percolación se realiza en ambas zonas (saturada y no saturada). Finalmente, la suma total de escurrentías y flujo de agua subterránea nos da el flujo de agua en general.

#### 4.7.3. Calibración del modelo

En esta etapa lo que se busca es ajustar la serie de datos calculados a la serie de datos observados (estaciones hidrométricas), para lo cual Hydro-BID posee parámetros que permiten realizar los mencionados ajustes; es necesario tener presente que el proceso de calibración consiste en un ajuste manual por la técnica de ensayo y error. En la Tabla 4 se detallan las mencionadas medidas de cálculo.

Tabla 4. Parámetros de calibración de Hydro-BID

Elaboración: Estudiante

Fuente: Fekadu, Miralles, & Muñoz Castillo, 2014.

| Parámetro            | Descripción  | Valor sugerido |
|----------------------|--|----------------|
| Número de curva (NC) | Este parámetro caracteriza el tipo y la hidrología del suelo. Los valores oscilan alrededor de 1, al reducir el valor reduce los caudales altos, es decir, menos sensibilidad a los eventos de lluvia. | ND             |

|   |  |       |
|---|--|-------|
| Contenido de agua en el suelo (AWC)     | Utilizado para aproximar el volumen de agua permitido con fines de almacenamiento en el suelo que luego será usado por las plantas, lo cual afecta directamente la percolación. Un aumento de este valor interacciona con el Coeficiente de Recesión y altera el caudal, lo que conlleva a mayor impacto en caudales bajos | 1     |
| Coeficiente de Recesión (R)             | Caracteriza la contribución del agua subterránea ubicada cerca de la superficie, al caudal de los ríos luego de un evento de caudales grandes.   | 0.01  |
| Seepage o coeficiente de permeabilidad  | Determina el intercambio entre aguas cercanas a la superficie con las zonas más profundas de los terrenos y los acuíferos.   | 0.005 |
| Factor ET para temporada de crecimiento | Esto depende del tipo de cultivo y su presencia, pues representa un aumento adicional de pérdidas por ET, por lo que un aumento de este valor disminuirá el valor de la escorrentía.   | 1     |
| Factor ET para la temporada durmiente   | También depende del tipo de cultivo y su presencia, pues representa un aumento adicional de pérdidas por ET, por lo que un aumento de este valor disminuirá el valor de la escorrentía.<br>La etapa corresponde a la que no se encuentra cultivada la zona.  | 1     |
| Porcentaje de la superficie impermeable | Muestra el porcentaje de superficie impermeable de la subcuenca. Al aumentar este valor, aumenta el volumen de escorrentía y también acorta el tiempo de tránsito.   | 2%    |

Es importante contar con serie de datos completos en el periodo de análisis, de la misma manera la temporalidad de simulación es la diaria. La correlación de datos observados y modelados empleando series estadísticas, fijan el valor de desempeño de la simulación, quizá este aspecto hace que se complique el uso debido a que por lo general los reportes de las estaciones meteorológicas en Ecuador es habitual obtenerlas en series mensuales, los mismos que se encuentran al público en el portal web del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2018).

#### **4.8. Modelo de asignación de recursos hídricos**

Para el presente estudio se usará los resultados de la aplicación del software MIKE BASIN desarrollado por el Instituto Hidráulico Danés (Grupo DHI), estos resultados son obtenidos por el Plan Hidráulico Regional de Demarcación Hidrográfica Esmeraldas, realizado por Changjiang Institute Of Survey, Planning, Design And Research; que juntamente con los resultados de Hydro-BID posibilitarán el análisis de la oferta y demanda de agua en la cuenca.

Mike Basin es desarrollado para usar sobre la plataforma ArcView/ArcGis del software GIS y se trata de un desarrollo modular basado en el modo de diagrama de red del sistema de recursos hídricos, que incluye:

- Yacimientos de agua.
- Cálculo de la demanda de agua.
- Regulación y asignación de los distintos usuarios del agua (doméstico, agrícola, industrial, etc.).
- Asignación de la producción de agua en toda la zona de simulación, el uso de agua es reglamentado según normas locales o globales de asignación de recursos hídricos.

Mike Basin aplica el principio de equilibrio de agua como principio básico; “el análisis del balance del agua de cada nodo es el núcleo del modelo de cálculo, así como la base de la oferta de los recursos hídricos y el análisis de la demanda de toda la industria”. (CISPDR, 2016)

##### **4.8.1. Datos de entrada**

El alcance y el nivel de detalle depende exclusivamente de la cantidad de información disponible y también depende del grado de dominio del modelador del tema de estudio. Para el presente caso la red de nodos de asignación de los recursos hídricos es discreta, debido a que la gestión de los recursos hídricos en la DH Esmeraldas tiene un bajo nivel de desarrollo y presenta gran falta de medidas estructurales.

Primeramente, se tiene como *nudo de uso de agua* la distribución de los usuarios del agua en cada ciudad (Tabla 5) y área de riego en la zona de estudio (Tabla 6).

Tabla 5. Distribución de usuarios de agua por cuenca y subcuenca

Elaboración: Estudiante

Fuente: CISPDR, 2016

| Cuenca       | Nombre de Ciudades  | Cantidad |
|--------------|---|----------|
| Esmeraldas   | Sigchos, Esmeraldas*, La Concordia, Puerto Quito, San Miguel De Los Bancos, Rosa Zarate (Quinindé), Pedro Vicente Maldonado, Santo Domingo De Los Colorados | 8        |
| Guayllabamba | Quito*, Cayambe, Machachi, Tabacundo, Sangolquí, San Miguel De Los Bancos   | 6        |

\* son capitales

Tabla 6. Distribución de las áreas de riego por cuenca y subcuenca

Elaboración: Estudiante

Fuente: CISPDR, 2016

| Cuenca       | Nombre de Ciudades  | Cantidad |
|--------------|---|----------|
| Esmeraldas   | Tabuche, Río Teaone, Toachi, Curso Alto Del Rio Toachi, Río Quinindé, Zumbahua                          | 6        |
| Guayllabamba | Machachi, Perucho Atahualpa Puellar, Río Apuela, Pisque, Al Este De Quito, Tumbaco, Cangahua, Tabacundo | 8        |

Seguidamente, como *nodo de suministro de agua*, se tiene los proyectos hídricos superficiales y subterráneos en cada unidad de asignación de agua, estimaciones estadísticas

para cada capacidad de suministro. Los nodos de suministro de agua se dividen en: Depósito con capacidad de regulación (añade como depósito independiente), nodo de suministro de agua virtual para proyectos pequeños y medianos con poca capacidad de regulación y el nodo de fuente de agua subterránea.

También se incluye el *nodo de trasvase de agua* en el diagrama de red de sistema de recursos hídricos, los proyectos de trasvase actual y previstos son, respectivamente, dispuestos como un nodo y un segmento orientado que se utiliza para conectar al usuario de agua correspondiente.

Finalmente, se tiene el *nodo de retorno*, que involucra la misma agua de entrada de todas las unidades de asignación. Los puntos de retorno se fijan agua debajo de las ciudades, en áreas relacionadas a riego y también usuarios de agua en cada unidad de asignación. Estas asignaciones se esquematizan en Gráfico 5.

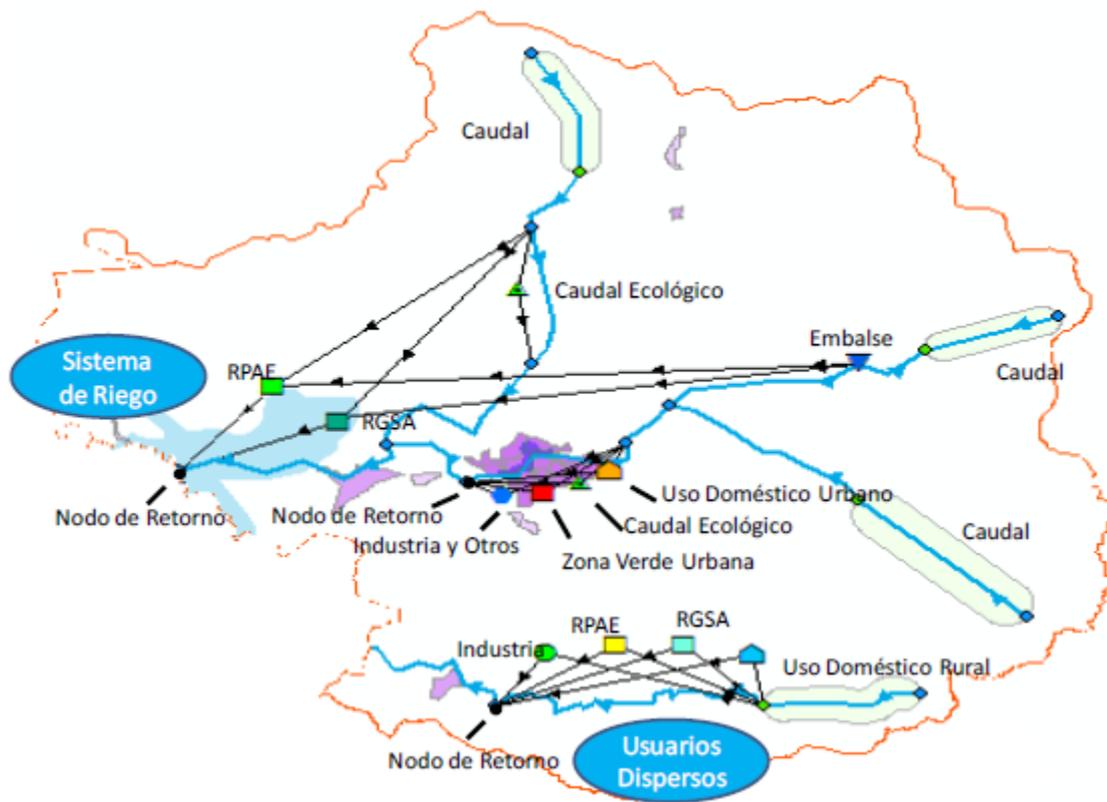


Gráfico 5..Diagrama esquemático de asignación de unidades de generalización de nodos

Fuente: CISPDR, 2016

#### 4.8.2. Escenarios y términos

Una vez construida el esquema de asignación de los recursos hídricos, CISPDR, en el 2016 plantea 2 escenarios para realizar los respectivos análisis de oferta y demanda, luego se integra a este análisis los resultados de Hydro-BID para dar el enfoque del cambio climático. Seguidamente se lista y describe brevemente los mencionados escenarios de análisis:

- **Escenario 1:** con el objetivo de evaluar la insuficiencia de la capacidad de suministro de los proyectos existentes, proporcionando así, la base para determinar las cantidades y la escala de la ingeniería hidráulica construida en el año horizonte de planificación. Con todo esto conocer la capacidad de suministro de agua en los años 2010, 2025 y 2035, tomando en cuenta la variabilidad y cambio climático.
- **Escenario 2:** se llevará a cabo a cabo cuando la capacidad de suministro actual no cumple con la demanda de agua en el año horizonte de planificación. El análisis de la cantidad de agua requerida y demandada en los años 2025 y 2035 considerando el incremento del suministro de agua mediante la construcción de nuevos proyectos de conservación del agua y el cambio climático dada por los RCP.

El presente estudio se compone en 3 etapas metodológicas:

- Estimación de la cantidad de agua disponible actual y futura.
- Determinación de la necesidad de agua actual y futura.
- Análisis de medidas viables para disminuir la demanda insatisfecha de los distintos sectores que dependen del agua planteadas por CISPDR con enfoque transversal de los efectos de cambio climático según escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5.

Para todo esto, todas las etapas constan de sus correspondientes fases que pueden ser esquematizadas en el Gráfico 6.

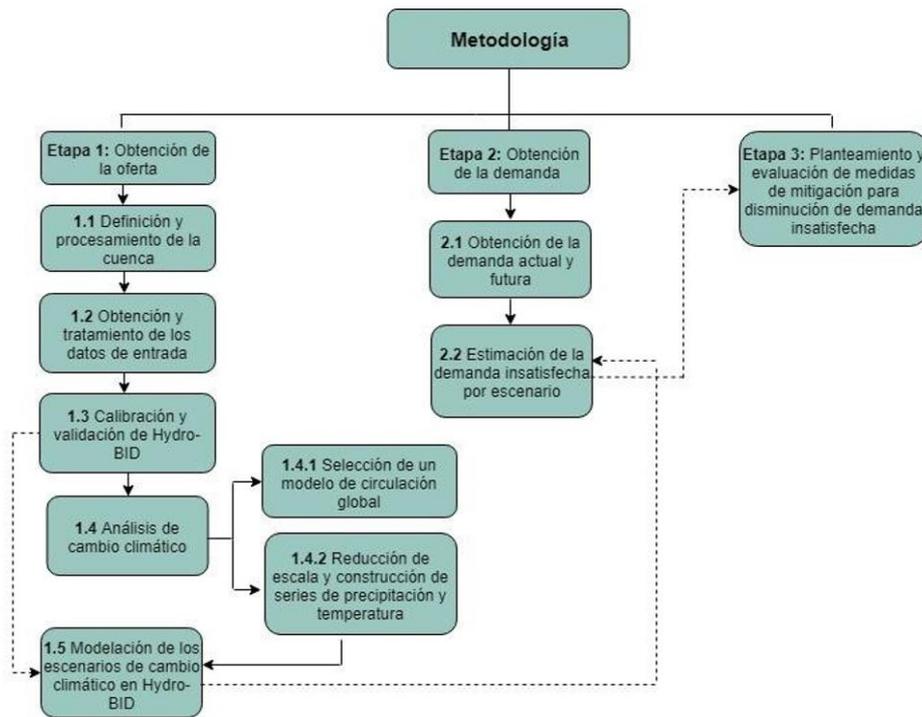


Gráfico 6. Esquema metodológico

Fuente: Pimiento Castañeda & Restrepo Caicedo, 2018

## 4.9. Estimación de la oferta hídrica

### 4.9.1. Procesamiento y Definición de la cuenca

La base de datos AHD mediante el uso de la herramienta Qgis, permite la demarcación y procesamiento de la cuenca de Esmeraldas. La herramienta denominada navegador AHD proporciona un número único de identificación de las subcuencas (COMID), de la misma manera se puede realizar una navegación por los segmentos principales, conocer la orientación del flujo y obtener datos morfométricos de la cuenca como el área, el perímetro y la longitud de la vertiente principal. De la misma manera con la ayuda de la misma herramienta GIS es posible determinar centroides de cada subcuenca, que se utilizará especialmente en el momento de interpolación climática para la distribución de la precipitación y la temperatura en todo el espacio de la cuenca.

### 4.9.2. Determinación y tratamiento de los datos de entrada

Como se mencionó anteriormente los datos principales de entrada lo conforman la temperatura y precipitación en series diarias; uso y tipo de suelo; y serie de caudales. El número de estaciones involucradas en el presente estudio. La temporalidad y la entidad fuente de estos datos se explica en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos de entrada del modelo

Elaboración: Estudiante

Fuente: Armenta Porras, 2015

| <b>Variable de ingreso</b>           | <b>Origen</b>                        | <b>Detalles</b>  | <b>Número de estaciones</b> | <b>Periodo de tiempo</b>    |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|
| Precipitación acumulada diaria en cm | Puntos de control climáticas locales | Datos proporcionados por INAMHI  | 45                          | 01/01/1981 hasta 31/01/2005 |
| Temperatura media diaria en °C       | Puntos de control climáticas locales | Datos obtenidos del INAMHI.  | 45                          |                             |
| Uso del suelo                        | Base de datos AHD                    | United State Geological Survey (USGS).   | -                           |                             |
| Tipo de suelo                        | Base de datos (AHD)                  | Armonized World Soil Database HWSD- en escala 1:5.000.000 Y U.S. Department of Agriculture (USDA). | -                           |                             |
| Series de caudales                   | Estaciones limnimétricas             | Datos obtenidos del INAMHI.  | 2                           |                             |

A todas las estaciones hidrometeorológicas del INAMHI se aplican el análisis estadístico. El método usado para obtener información de precipitaciones y temperatura en cada estación meteorológica detectada fue el de reducción de escala estadística y mediante el método de ensamble de confiabilidad ponderada (REA). Seguidamente, por requerimientos de Hydro-BID se realiza la interpolación de los datos climáticos, esto permite la incorporación de los datos de precipitación y temperatura para cada subcuenca (catchemnt).

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. Calibración y validación del modelo Hydro-BID**

La comprobación del modelo se realiza en dos momentos, la primera en la cuenca de Esmeraldas que ocupa el 53,31% del área de estudio, pero al tener la estación hidrométrica en la subcuenca aguas más abajo, la escorrentía registrada corresponde a toda el área de drenaje del estudio. Luego, la validación se realiza en la cuenca de Guayllabamba que representa el 46,69% del área de estudio. Este orden de calibración del modelo se debe a que no se cuenta con mayor número de estaciones hidrométricas que permitan subdividir en otras subcuencas, las existentes, pocas cuentan con registros continuos y con datos por periodos mayores de 5 años. Los caudales observados son totalmente necesarios para calibrar el modelo, se trata de un procedimiento manual de ensayo y error, para lo cual se tuvo en cuenta el periodo comprendido entre el 01/01/1996 al 31/12/2011 en el primer caso y el periodo comprendido entre 01/01/1996 a 31/12/2005 para el segundo caso, ya que para este lapso de tiempo se pudo obtener series de datos completos del caudal.

En el Mapa 5 se puede ver la relación entre las cuencas modeladas y las estaciones hidrométricas respectivas. Para la calibración de la cuenca de Esmeraldas se utiliza la subcuenca de cierre con el COMID 302861037, mientras que para la calibración de la cuenca de Guayllabamba se utiliza subcuenca de cierre con el COMID 302925001. De la misma forma, para la cuenca de Esmeraldas se toma los caudales observados de la estación H0168-ESMERAL DJ SADE, y para Guayllabamba, los caudales registrados por la estación hidrométrica H0170-GUAYLLA AJ BLANCO.

Los parámetros de calibración y las métricas de desempeño usadas para la modelación de la cuenca de Esmeraldas son las mismas listadas en Tabla 7.

La curva de duración de caudales permite observar descriptivamente la conducta de los caudales observados y simulados.

Los resultados podemos observar más adelante. Ver Tabla 11.

### **5.2. Análisis de cambio climático**

Una vez realizada la calibración y validación del modelo, se procede a seleccionar un GCM apropiado que permita determinar la proyección de las variables climáticas, para lo cual fue

necesario apoyarse del estudio de las proyecciones de precipitaciones y temperatura para Ecuador, realizado por Armenta Porras en el 2016, en el que como resultados se prevén incrementos de temperatura y precipitación en el área de estudio y para el horizonte de proyecto propuesto por la CISPDR.

Debido a que los estudios hidrometeorológicos regionales requieren datos de mayor precisión, los datos de los modelos globales deben ser sometidos a un proceso de reducción de escala. El método estadístico seleccionado se basa en la teoría del caos, para lo cual se requiere datos históricos de los mencionados modelos para los RCP 2.6 y RCP 8.5, de la misma manera se requiere georreferenciar las estaciones meteorológicas y también es necesario realizar la codificación respectiva (Armenta Porras, Villa Cedeño, & Jácome, 2016).

### **5.3. Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático (CC)**

Con la reducción de escala de la serie de datos climáticos y la interpolación de estos datos, se procedió con la simulación para los diferentes escenarios en la cuenca de Esmeraldas, donde el identificador correspondiente es el COMID 302861037 y la estación hidrométrica relacionada es la H0168-ESMERAL DJ SADE. Esta simulación se realiza con la activación de la casilla “all catchment”, para que los resultados sean computados en todas las subcuencas y no solo en la subcuenca de cierre. El análisis se realiza en tres periodos, el primero del año de estudio del CISPDR (2016) al 2040, el segundo de 2041 a 2070 y el tercero de 2070 a 2100. Finalmente, los resultados de calibración son el caudal mensual ilustrado en la pantalla de Hydro-BID y una hoja electrónica con el cálculo del balance hídrico de cada subcuenca que reposa en la carpeta de salida, que fue configurada al inicio de la instalación del programa. De la misma manera en la pantalla principal del programa se puede observar la curva de calibración que se convierte en guía principal de nuestra aproximación entre lo modelado y lo observado.

### **5.4. Determinación de la demanda de agua actual y futura**

En el cálculo de la demanda se consideran los que son de usos consuntivos y no consuntivos, los que prestan mayor interés en el presente estudio son los consuntivos como son los de consumo doméstico, agricultura e industria. Según la CISPDR, la clasificación de los usuarios del agua en la cuenca de estudio puede esquematizarse de la siguiente manera. Ver Gráfico 7.

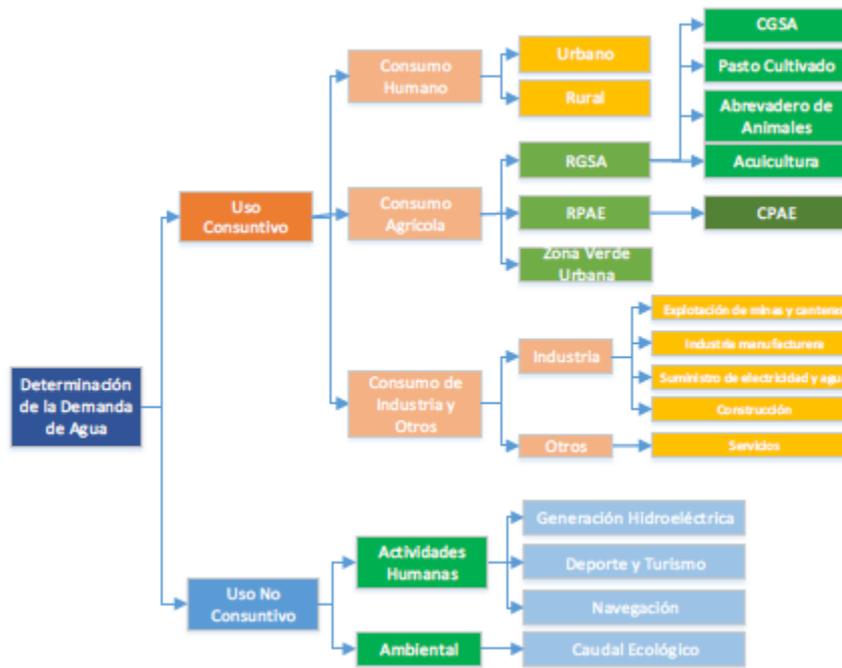


Gráfico 7 Clasificación de usos de agua en la cuenca de Esmeraldas

Fuente: CISPDR, 2016

Para de la demanda actual se determina el consumo de agua para las ciudades y grandes zonas de riego de la cuenca de estudio, de la misma forma del tipo de captación o suministro por cada uso, con el fin de obtener los valores se establece una clasificación doméstica, agrícola o industrial. Según la metodología de cálculo propuesta CISPDR (Método de dotaciones), se ubicaron los puntos de demanda (a nivel de provincia) a lo largo de la zona de estudio.

Para los puntos de demanda doméstico se clasifica en residentes urbanos y rurales, para ambos casos la fórmula empleada es la siguiente:

$$W = P_d \times Q_d / n_d$$

Donde,

W es la demanda de agua doméstica ya sea para la población urbana o rural, según sea el caso

Pd es población (urbana o rural)

Qd es la dotación de agua doméstica urbana o rural

Nd es el coeficiente de utilización de agua para uso doméstico ya sea urbano o rural de la misma manera que en los casos anteriores. Se considera valores de 0.75 a 0.80, según el tamaño de las ciudades y la antigüedad de la red, para el futuro 0.80 a 0.85 dependiendo de las mejoras en el suministro de agua.

En cuanto a la demanda de agua para uso agrícola incluye riego, acuicultura y ganadería, se desglosa de la siguiente manera: agua para riego se tiene el uso en pastizales y cultivos en general; como demanda de agua para ganadería se entiende el uso de agua para abrevaderos de animales grandes, pequeños y aves de corral; la acuicultura solo incluirá la de agua dulce. Ver Tabla 8

Tabla 8. Cálculo de demanda de agua según su uso

Elaboración propia

Fuente: CISPDR, 2016

| USO         | FORMULA   | VARIABLES   |
|-------------|---|---|
| Agrícola    | $W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{cropi,cropj} / \eta_i + \sum_{i=1}^n W_{grassi} / \eta_i$ | <p>W= demanda agua de riego m<sup>3</sup>;</p> <p>W<sub>cropi,cropj</sub>= demanda agua de riego (m<sup>3</sup>) para cultivo j en la unidad de asignación i;</p> <p>W<sub>grassi</sub> = demanda de agua de la hierba (m<sup>3</sup>) en la unidad de asignación i;</p> <p><math>\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i \times A_i / \sum_{i=1}^n A_i</math></p> <p>η=coeficiente utilización del agua</p> <p>A<sub>i</sub>= área de riego del método i</p> <p>η<sub>i</sub>= utilización del agua método de riego i</p> |
| Ganadería   | $W = (P_g \times Q_g + P_p \times Q_p + P_a \times Q_a) / \eta_c$                           | <p>W= demanda de agua para el ganado (l);</p> <p>P<sub>g</sub>= cantidad de animales grandes;</p> <p>Q<sub>g</sub>= dotación de agua por animal grande (l/cab/día);</p> <p>P<sub>p</sub>= cantidad de animales pequeños;</p> <p>Q<sub>p</sub>= dotación de agua por animal pequeño (l/cab/día);</p> <p>P<sub>a</sub>= cantidad de aves de corral;</p> <p>Q<sub>a</sub>= dotación de agua por cada ave de corral (l/cab/día);</p> <p>η<sub>c</sub>=coeficiente utilización del agua</p>                        |
| Acuicultura | $W = A_a \times Q_a / \eta_c$   | <p>W= demanda de agua para acuicultura (m<sup>3</sup>);</p> <p>A<sub>a</sub>= Área de acuicultura de agua dulce (ha); Q<sub>a</sub>= dotación de agua acuicultura de agua dulce (m<sup>3</sup>/ha);</p> <p>η<sub>c</sub>=coeficiente utilización del agua</p>   |

|                        |   |  |
|------------------------|---|--|
| Espacios verdes urbano | $W=365 \times A_e \times Q_e / \eta / 1000$ | W= demanda de agua para espacio verde (m <sup>3</sup> ); A <sub>e</sub> = Área de zona verde urbano (m <sup>2</sup> ); Q <sub>e</sub> = dotación de agua espacios verdes urbanos (l/m <sup>2</sup> /día); η <sub>e</sub> =coeficiente utilización del agua |
|------------------------|---|--|

Finalmente, para el caso de la necesidad de agua de las industrias se toma en cuenta la utilización de canteras y minas, manufactura, provisión de electricidad y agua, y construcción. La totalidad de los puntos de demanda se calcula por estos 4 subsectores, de la misma forma que en la sección anterior los cálculos y variables pueden ser detallados en la Tabla 9.

Tabla 9. Cálculo de demanda de agua de uso industrial

Elaboración propia

Fuente: CISPDR, 2016

| USO                               | FORMULA                           | VARIABLES  |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Explotación de minas y canteras   | $W=P_o \times Q_o / \eta$         | W= demanda agua de la industria m <sup>3</sup> ;<br>P <sub>o</sub> = Valor añadido de la industria minera (mil USD);<br>η=coeficiente utilización del agua   |
| Industria manufacturera           | $W= P_i \times Q_i / \eta$        | W= demanda de las industrias manufactureras m <sup>3</sup> ;<br>P <sub>o</sub> = Valor añadido de la industria manufacturera (mil USD);<br>η=coeficiente utilización del agua  |
| Suministro de electricidad y agua | $W=P_t \times Q_t / \eta / 1000$  | W= demanda de agua para energía térmica (m <sup>3</sup> );<br>P <sub>t</sub> = Capacidad de generación de energía térmica (W.h);<br>Q <sub>t</sub> = dotación de agua de energía térmica (l/W.h);<br>η <sub>e</sub> =coeficiente utilización del agua                        |
| Construcción                      | $W= A_c \times Q_c / \eta / 1000$ | W= demanda de agua de la industria de construcción (m <sup>3</sup> );<br>A <sub>c</sub> = Área de la construcción (m <sup>2</sup> );<br>Q <sub>c</sub> = dotación de agua sector de la construcción (l/m <sup>2</sup> );<br>η <sub>c</sub> =coeficiente utilización del agua |

Finalmente, la demanda del agua para otros usos según CISPDR, 2016, esta relacionada con los servicios, para lo cual se adoptó el método general de las dotaciones para su cálculo:

$$W = P_s \times Q_s / \eta$$

Donde;

W es la demanda de agua de servicios (m<sup>3</sup>);

P<sub>s</sub> es el valor de sector de servicios (mil USD) que se añade;

Q<sub>s</sub> representa la dotación de agua del sector servicios (m<sup>3</sup>/mil USD);

η es el coeficiente de utilización del agua.

Un Resumen de los Resultados se puede observar en la Tabla 10.

En cuanto a los usos no consuntivos en este estudio, simplemente pasaremos a describir, estos son:

- Generación hidroeléctrica, se tiene 15 centrales eléctricas dentro de DH Esmeraldas con capacidad de 133.93MW. Para 2025 se prevé 2 nuevos proyectos multipropósito que incluyen centrales hidroeléctricas con capacidad de 71MW, que necesitará 27167 hm<sup>3</sup> y para el 2035, 6 nuevos proyectos multipropósito que necesitarán 9066 hm<sup>3</sup>.
- Deporte y turismo, deportes de agua al aire libre, cuerpos de agua artificial y piscinas cubiertas.
- Demanda para navegación, en la DH Esmeraldas son pocos los ríos navegables, las navegaciones pequeñas sirven principalmente de mercancía de pasajeros y productos para pequeñas comunidades rurales.
- Demanda de agua de uso ecológico, esta demanda en los últimos años ha cobrado real importancia en toda la concepción de proyectos hídricos. En la zona de estudio, el método de cálculo es la de Curva de Duración de Flujo, en la que los datos mensuales históricos son utilizados para obtener la curva mensual de caudales y un flujo de frecuencia acumulado en particular (Q<sub>p</sub>, 95% para el valor de p) se toma como caudal ecológico, P<sub>95</sub> se utiliza como el valor del caudal ecológico para la costa ecuatoriana.

Sobre el tema de las proyecciones de demanda, CISPDR, 2016, a pesar de varias incertidumbres que encuentra relacionadas con la predicción del consumo de agua en el futuro, analiza por cada tipo de consumo el patrón de desarrollo de la sociedad en el futuro y la influencia del desarrollo económico y social de la DH Esmeraldas. Mediante el

mencionado análisis estima el crecimiento de la demanda del recurso hídrico tomando en cuenta los aspectos como el crecimiento poblacional, cambios en el uso del suelo como el tema de la urbanización, cambios en la estructura industrial y la producción agrícola, y también analiza el crecimiento de la cobertura de las áreas de riego. De los anexos del estudio realizado por la empresa consultora se ha organizado las proyecciones de consumo por provincia y tipo de uso del agua, todo esto para el año horizonte del proyecto.<sup>1</sup>. Ver Tabla10.

Tabla 10. Puntos de demanda de la cuenca del río Esmeraldas (hm<sup>3</sup>)

Elaboración: Estudiante

Fuente: CISPDR, 2016

| <b>Provincia</b> | <b>Tipo de uso</b> | <b>2010<br/>(hm3)</b> | <b>2025<br/>(hm3)</b> | <b>2035<br/>(hm3)</b> |
|------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Cotopaxi         | Doméstico          | 2.17                  | 2.79                  | 3.34                  |
|                  | Riego              | 23.02                 | 54.10                 | 58.64                 |
|                  | Ganadería          | 2.75                  | 3.74                  | 4.00                  |
|                  | Acuicultura        | 5.14                  | 4.65                  | 4.24                  |
|                  | Industrial y otros | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Esmeraldas       | Doméstico          | 33.39                 | 39.75                 | 43.67                 |
|                  | Riego              | 33.59                 | 152.38                | 184.23                |
|                  | Ganadería          | 4.11                  | 5.17                  | 4.54                  |
|                  | Acuicultura        | 0.81                  | 0.74                  | 0.67                  |
|                  | Industrial y otros | 12.00                 | 14.00                 | 14.00                 |
| Manabí           | Doméstico          | 3.51                  | 3.73                  | 3.83                  |
|                  | Riego              | 8.64                  | 8.66                  | 21.67                 |
|                  | Ganadería          | 4.23                  | 5.38                  | 5.62                  |
|                  | Acuicultura        | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
|                  | Industrial y otros | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Pichincha        | Doméstico          | 256.45                | 289.26                | 310.35                |
|                  | Riego              | 302.81                | 446.22                | 475.49                |
|                  | Ganadería          | 14.37                 | 18.99                 | 19.90                 |
|                  | Acuicultura        | 6.31                  | 5.71                  | 5.20                  |
|                  | Industrial y otros | 783.00                | 877.00                | 931.00                |
| Santo Domingo    | Doméstico          | 8.84                  | 9.32                  | 9.72                  |
|                  | Riego              | 7.96                  | 33.91                 | 44.71                 |
|                  | Ganadería          | 6.41                  | 9.45                  | 10.37                 |
|                  | Acuicultura        | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
|                  | Industrial y otros | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Imbabura         | Doméstico          | 0.88                  | 1.19                  | 1.46                  |
|                  | Riego              | 17.27                 | 17.32                 | 48.88                 |

<sup>1</sup> Cfr: CISPDR, Anexo III, 2016, 75

|                      |                           |                |                |                |
|----------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | Ganadería                 | 0.94           | 1.22           | 1.29           |
|                      | Acuicultura               | 5.95           | 5.38           | 4.91           |
|                      | Industrial y otros        | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| <b>TOTAL</b>         | <b>Doméstico</b>          | <b>305.24</b>  | <b>346.04</b>  | <b>372.37</b>  |
|                      | <b>Riego</b>              | <b>393.29</b>  | <b>712.59</b>  | <b>833.62</b>  |
|                      | <b>Ganadería</b>          | <b>32.81</b>   | <b>43.95</b>   | <b>45.72</b>   |
|                      | <b>Acuicultura</b>        | <b>18.21</b>   | <b>16.48</b>   | <b>15.02</b>   |
|                      | <b>Industrial y otros</b> | <b>795.00</b>  | <b>891.00</b>  | <b>945.00</b>  |
| <b>TOTAL GENERAL</b> |                           | <b>1544.55</b> | <b>2010.06</b> | <b>2211.73</b> |

Para complementar el análisis de la disponibilidad de agua, a los datos obtenidos por CISPDR, 2016, se realiza un análisis comparativo entre las series de caudales conseguidas con Hydro-BID y los obtenidos por MIKE BASING, de la misma manera los escenarios de análisis son el RCP 2.6 y RCP 8.5.

## **5.5. Obtención de la oferta hídrica**

### **5.5.1. Adecuación de los datos de entrada**

La investigación realizada por Armenta Porras en el 2016, menciona que para realizar las proyecciones climáticas se realizó el chequeo de la información a nivel nacional de las estaciones del INAMHI en el periodo de 1981-2005, se escogió este periodo debido a su confiabilidad y disponibilidad de datos en número suficiente, al menos 85% de información, además se contó para el mismo periodo, datos de modelos globales; por lo tanto la calibración se limitara al uso de estos datos de precipitación y temperatura del mencionado periodo. En el trabajo de Armenta, estos datos fueron ya sometidos a controles de calidad de las series mensuales, y se logró completar con los datos diarios el respectivo periodo. Para este trabajo se contó con las siguientes estaciones a nivel nacional:

- 137 estaciones de precipitación
- 32 estaciones de temperatura media
- 34 estaciones de temperatura máxima media
- 29 estaciones de temperatura mínima media

Para el caso de las proyecciones, a los datos obtenidos de los modelos globales, Armenta Porras realiza una reducción de escala estadístico usando los modelos seleccionados (15 en

total) y como en todo modelo los datos observados se comparan con los obtenidos para el respectivo periodo de control.

### 5.5.2. Calibración y validación del modelo Hydro-BID

Con el ejercicio de la calibración se hace más apreciable la relación que existe entre los distintos parámetros del modelo y su efecto causado en la simulación del caudal, estas relaciones se resumen seguidamente:

- El caudal de la cuenca es inversamente proporcional a las Pérdidas (Seepage).
- El coeficiente de Recesión ( R ) es directamente proporcional a la pendiente de la curva duración de flujo.
- El número de curva (NC) se relaciona con la sensibilidad de los caudales a los eventos de precipitación.
- El valor del contenido disponible del agua (AWC) es directamente proporcional a la pendiente de la curva de duración de flujo.

Los resultados de la calibración de la cuenca de esmeraldas se detallan en la Tabla 11.

*Tabla 11 . Parámetros de calibración de la Cuenca de Esmeraldas y Subcuenca del Guayllabamba.  
Elaboración: Estudiante*

| Parámetro                | Subcuenca | 302861037                    | Subcuenca | 302925001                  |
|--------------------------|-----------|------------------------------|-----------|----------------------------|
| Estación                 |           | H0168-<br>ESMERAL DJ<br>SADE |           | H0170-GUAYLLA AJ<br>BLANCO |
| NC                       |           | 1.36                         |           | 1.36                       |
| AWC                      |           | 0.2                          |           | 0.2                        |
| R                        |           | 0.035                        |           | 0.08                       |
| Seepage                  |           | 0.00001                      |           | 0.00001                    |
| Grow Season ET Factor    |           | 0.5                          |           | 0.5                        |
| Dormant Season ET Factor |           | 0.5                          |           | 0.5                        |

Para evaluar la bondad del ajuste seguidamente se ilustra las métricas de desempeño obtenidas en cada caso. Estas métricas varían de acuerdo con las series escogidas, pudiendo ser a nivel diario y mensual y se organiza de acuerdo con las cuencas analizadas. El periodo de análisis fue desde el año de 1993 al 2005 y que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Métricas de desempeño diarias por subcuenca

Elaboración: Estudiante

Fuente:

| <b>Métricas de desempeño diario</b>  | <b>Subcuenca</b> | <b>301270200</b>         | <b>Subcuenca</b> | <b>302925001</b>           |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|
| <b>Estación</b>                      |                  | H0168-ESMERAL DJ<br>SADE |                  | H0170-GUAYLLA AJ<br>BLANCO |
| <b>Volumen de error general</b>      |                  | -4.86                    |                  | -12.8                      |
| <b>Correlación (R)</b>               |                  | 0.7                      |                  | 0.5                        |
| <b>Correlación modificada</b>        |                  | 0.65                     |                  | 0.4                        |
| <b>Eficiencia de Nash- Sutcliffe</b> |                  | 0.44                     |                  | 0.11                       |

Analizando estas métricas de desempeño reflejadas en la Tabla 12, se puede concluir que el proceso de calibración es bastante admisible si se hace referencia a los valores medios mensuales o anuales. Para la cuenca de Guayllabamba no sucede igual especialmente para las series diarias. Los valores positivos de la eficiencia de Nash nos indica que el modelo sobreestima los caudales simulados y carece de confiabilidad suficiente para el presente caso, pero si se analiza los resultados a nivel mensual, mejoran esencialmente, por lo que se sugiere trabajar con la media mensual que nos da mayor confiabilidad en la simulación.

Los valores sugeridos por Hydro-BID que dan el mejor ajuste son:

- Volumen de error general (Overall volumen error): +/- (20-30 o 20-40)
- Número de correlación (Correlación r): Lo más cercano posible a 1
- Correlación del modelo (Model correlation): Lo más cercano posible a 1
- Nash-Sutcliffe Efficiency: Cercano a 0.4 ó 0.6

Luego comparando los valores recomendados versus los valores de control obtenidos, podemos mencionar que el modelo presenta mejores ajustes en la cuenca de Esmeraldas, esto se debe a que para la estación hidrográfica relacionada se tiene datos para periodos de tiempo un poco más extensos y más completos que en la cuenca de Guayllabamba. A pesar de que el error entre valores simulados y los valores observados (Overall volumen error) este

fuera de rango, la curva de duración de flujo y las estadísticas tienen buena coincidencia (Gráfica 8).

Para la cuenca de Guayllabamba estas coincidencias reducen un poco más por las razones antes mencionadas, en especial la correlación (R) alcanzaría apenas el 50% para las series diarias, pero sin embargo como se explicó anteriormente para series mensuales, el ajuste se mejora. Todo esto significa que la caracterización del volumen del agua que transita por la cuenca es bastante aceptable.

Se puede mencionar, además que, para la cuenca de Guayllabamba y la cuenca de Esmeraldas, a pesar de mostrar una baja correlación, existe una interdependencia apropiada entre las variables estudiadas. La sensibilidad de la métrica a valores picos hace que los resultados de las series diarias se descarten y se opten por los resultados de las series mensuales, ya que en esta temporalidad se valora directamente el promedio del conjunto de datos más no los picos resultantes, de esta manera la correlación entre los datos observados y los modelados mejora sustancialmente, hasta tener valores de correlación superior a 0.7. Adicionalmente, el software de Hydro-BID es usado para representar condiciones medias para la planificación, por lo que el modelo no prioriza los caudales picos.

Para mejor interpretación se puede observar que tanto para la calibración (Gráfico 8 - A) como la para validación (Gráfico 8 - B), la línea azul de las curvas de duración representa el flujo modelado y la línea roja el flujo observado. En donde se observa un trazado casi paralelo que significa que un buen porcentaje de datos simulados son iguales a los datos observados, mientras más juntas están estas dos líneas, mejor es la correlación existente.

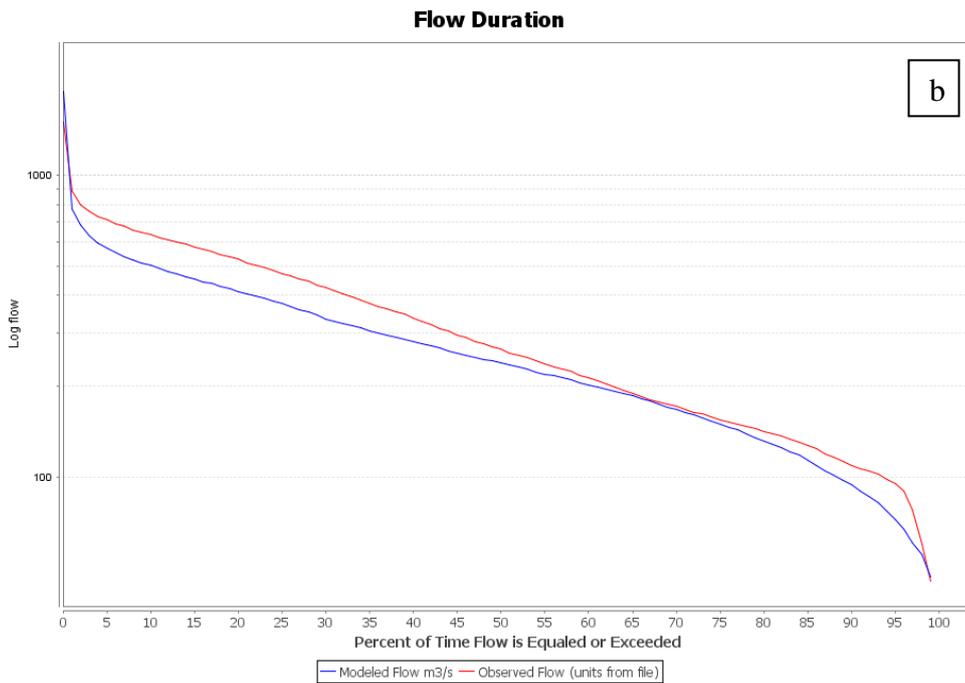
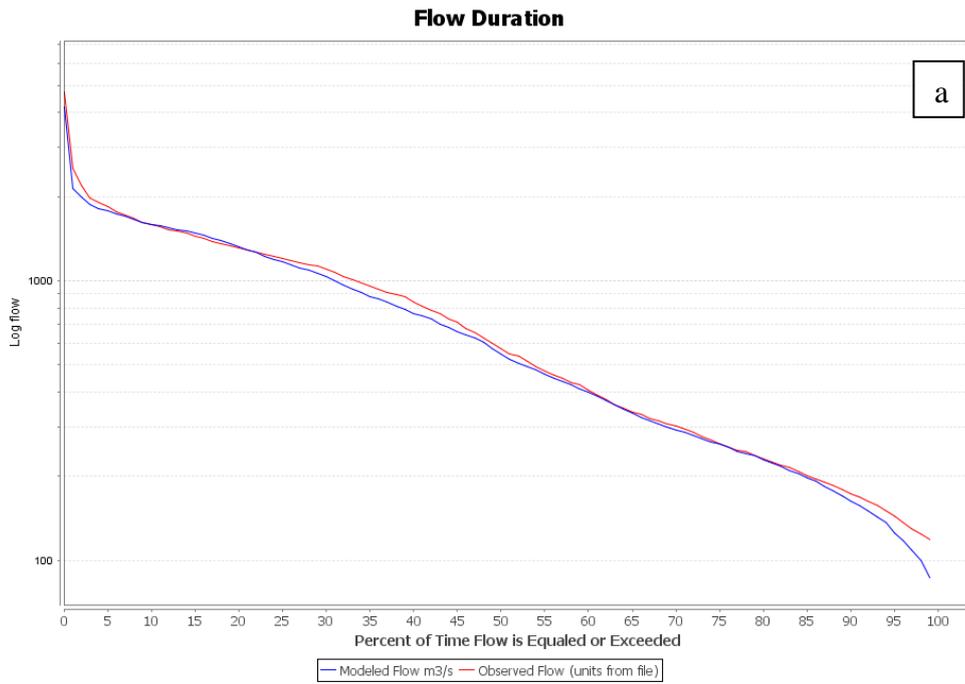


Gráfico 8. Curvas de duración para la calibración. A) Cuenca Esmeraldas y b) Subcuenca Guayllabamba  
Elaboración: Estudiante

En este ejercicio los parámetros que mostraron mayor sensibilidad en la calibración de Hydro-BID, han sido la pérdida por infiltración (Seepage), Curve Number y el Contenido Disponible de Agua (AWC), esta aseveración se llega debido a que los mencionados parámetros han condicionado la cantidad de esorrentía generada a lo largo de la cuenca de

estudio, cualquier cambio de valores de estos parámetros se interrelacionan y modifican la curva de duración de flujo.

La curva de duración de flujo del Gráfico 9, muestra que los resultados de los caudales en series diarias no guardan una correlación apropiada con los datos observados, pero al analizar los promedios, la simulación se torna de mayor precisión. Los años con mayor diferencia entre los resultados son el de 1999 y el de 2004. Al observar detenidamente la analogía entre el comportamiento de los caudales de la cuenca (azul para el caudal modelado y magenta para el observado) con el comportamiento de la precipitación (líneas cian mostradas en la parte superior de la gráfica), se puede concluir que la escorrentía es directamente proporcional a la lluvia, es decir, a mayor precipitación recibida en la cuenca, ésta producirá mayor volumen de escorrentía.

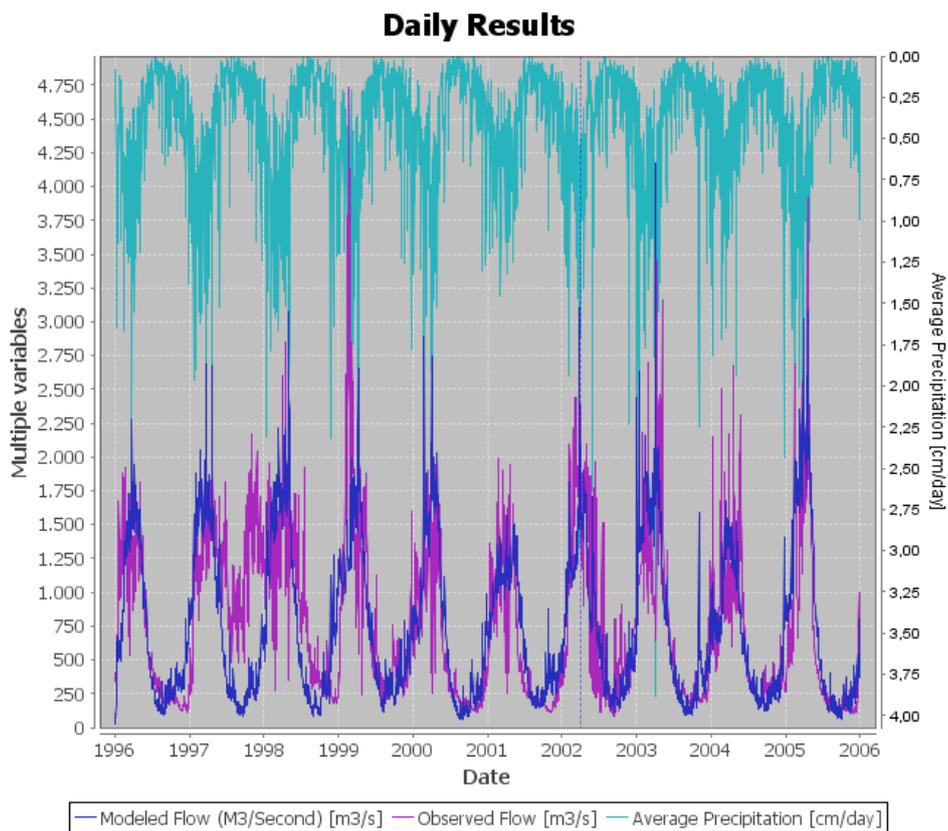


Gráfico 9 . Precipitación vs caudales para las condiciones actuales en escala diaria

Elaboración: Estudiante

### 5.5.3. Análisis de cambio climático

Para las proyecciones climáticas se procede a seleccionar el GCM de mejor, esto se realiza con los datos globales ajustados, Armenta Porras, realiza la valoración de estos datos confrontando con los datos observados, para lo cual se basa en tres métricas:

- Correlación. – indica la correspondencia o relación recíproca entre los valores calculados y observados, de la misma manera muestra la orientación de una relación lineal y de proporcionalidad entre dos variables.
- BIAS. - Medida de precisión, mide el contraste entre el valor imitado y el valor medido de la variable.
- RAMSE. - Raíz del error cuadrático medio, raíz cuadrada de los errores cuadráticos

Con este proceso se realiza una clasificación denominada tipo “semáforo”, según Armentas Porras, 2016, los 15 modelos muestran una buena representación para el territorio; de los cuales realiza una clasificación de cuatro modelos de mejor comportamiento, es decir, los que poseen correlación mayor a 0,5; sesgo BIAS inferior a 0,35mm (precipitación) y sesgo BIAS inferior a 0,01°C (temperatura); y finalmente, RMSE inferior a 90mm (precipitación) y RMSE inferior a 1°C (temperatura). Esta clasificación se lo puede observar en la Tabla 13

Tabla 13. Clasificación de 15 GCM según métricas seleccionadas

Fuente: Armenta Porras, 2016

| Resumen Métricas | CORRELACIÓN |       |       |       | BIAS  |       |       |       | RMSE  |       |       |       |
|------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | MODELO      | Prec  | Tmed  | Tmax  | Tmin  | Prec  | Tmed  | Tmax  | Tmin  | Prec  | Tmed  | Tmax  |
| bcc-csm1-1-m     | 0,51        | 0,461 | 0,428 | 0,427 | 0,358 | 0,010 | 0,013 | 0,007 | 89,2  | 0,819 | 1,184 | 1,033 |
| CCSM4            | 0,46        | 0,557 | 0,5   | 0,468 | 0,418 | 0,009 | 0,009 | 0,006 | 93,3  | 0,722 | 1,098 | 1,006 |
| CSIRO-Mk3-6-0    | 0,51        | 0,535 | 0,439 | 0,486 | 0,397 | 0,008 | 0,014 | 0,006 | 91,2  | 0,717 | 1,176 | 0,980 |
| FIO-ESM          | 0,47        | 0,506 | 0,458 | 0,515 | 0,499 | 0,008 | 0,010 | 0,005 | 93,6  | 0,775 | 1,117 | 0,952 |
| GFDL-CM3         | 0,49        | 0,358 | 0,272 | 0,419 | 0,346 | 0,008 | 0,016 | 0,009 | 88,6  | 0,925 | 1,507 | 1,041 |
| GISS-E2-H        | 0,48        | 0,49  | 0,498 | 0,465 | 0,411 | 0,006 | 0,009 | 0,005 | 92,2  | 0,732 | 1,020 | 0,976 |
| GISS-E2-R        | 0,51        | 0,495 | 0,499 | 0,482 | 0,402 | 0,004 | 0,008 | 0,004 | 88,4  | 0,723 | 1,003 | 0,959 |
| HadGEM2-AO       | 0,43        | 0,539 | 0,526 | 0,472 | 0,613 | 0,004 | 0,006 | 0,004 | 103,3 | 0,704 | 0,978 | 0,973 |
| IPSL-CM5A-LR     | 0,54        | 0,567 | 0,508 | 0,37  | 0,301 | 0,012 | 0,009 | 0,010 | 86,3  | 0,685 | 1,018 | 1,250 |
| IPSL-CM5A-MR     | 0,51        | 0,555 | 0,501 | 0,389 | 0,352 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 88,0  | 0,673 | 1,019 | 1,124 |
| MIROC5           | 0,56        | 0,467 | 0,367 | 0,499 | 0,186 | 0,008 | 0,025 | 0,004 | 82,0  | 0,761 | 1,459 | 0,929 |
| MIROC-ESM        | 0,55        | 0,483 | 0,404 | 0,509 | 0,176 | 0,005 | 0,018 | 0,003 | 83,4  | 0,705 | 1,222 | 0,928 |
| MIROC-ESM-CHEM   | 0,47        | 0,506 | 0,424 | 0,487 | 0,462 | 0,009 | 0,009 | 0,006 | 92,9  | 0,753 | 1,170 | 0,966 |
| MRI-CGCM3        | 0,46        | 0,524 | 0,477 | 0,469 | 0,479 | 0,005 | 0,011 | 0,006 | 95,1  | 0,682 | 1,056 | 0,965 |
| NorESM1-ME       | 0,51        | 0,452 | 0,464 | 0,437 | 0,320 | 0,004 | 0,007 | 0,005 | 87,1  | 0,875 | 1,038 | 0,994 |

Luego con el fin de generar un ensamble multimodelo de los modelos que mejor comportamiento tienen, con la intención de generar las proyecciones de precipitaciones y las temperaturas se implementa el método Reliability Ensemble Averaging (REA-Ensamble ponderado de fiabilidad). (Armenta Porras, 2016). La combinación de salidas de los modelos de circulación global se tomo con dos criterios: criterio de desempeño y criterio de convergencia.

Los cuatro modelos que mejor representación tienen del clima de Ecuador se muestran en la Tabla 14.

*Tabla 14. Listado de modelos seleccionados para la tercera comunicación nacional*

*Fuente: Armenta Porras, 2016*

| Modelo        | Institución   | Resolución (°) |
|---------------|---|----------------|
| CSIRO-Mk3-6-0 | CSIRO-QCCCE – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence                                   | 1.875x1.8653   |
| GISS-E2-R     | NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies  | 2.5x2          |
| IPSL-CM5A-MR  | IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace  | 2.5x2.5352     |
| MIROC-ESM     | MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | 2.8125x2.7906  |

Como conclusiones generales, Armenta Porras, 2016, sostiene que las proyecciones de temperatura estimados por Ensamble son apropiadas, de esta manera el método se convierte en un buen instrumento para establecer los resultados de escenarios de cambio climático. Seguidamente el autor determinó los incrementos o disminuciones de la temperatura para varias zonas del país, precisando que el escenario más desfavorable viene a ser el RCP 8.5, ya que para este caso el incremento de temperatura es significativo (superior a 2°C), estos incrementos serán mayormente definidos en la costa, oriente y la región insular, mientras que para el escenario RCP 2.6, no registra grandes variaciones en cuanto a temperatura. Analizando la distribución de frecuencias para la zona de estudio (Costa y Sierra), en los distintos periodos y para los cuatro escenarios se tiene en la Tabla 15.

*Tabla 15. Anomalía de la temperatura media por regiones, proyectado por los 4 escenarios RCP*

*Elaboración: Estudiante*

| <b>2011-2040</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Costa (°C)       | 0.78           | 0.91           | 0.73           | 0.9            |
| Sierra (°C)      | 0.56           | 0.64           | 0.62           | 0.75           |
| <b>2041-2070</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
| Costa (°C)       | 1.10           | 1.78           | 1.62           | 2.13           |
| Sierra (°C)      | 0.78           | 0.1.16         | 1.09           | 1.54           |
| <b>2071-2100</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
| Costa (°C)       | 1.00           | 2.20           | 2.41           | 2.91           |
| Sierra (°C)      | 0.72           | 1.53           | 1.71           | 2.49           |

De la misma manera para el examen del cambio de la precipitación (Tabla 16), el autor especifica que no existen cambios a nivel de precipitaciones para el periodo comprendido entre 2011 y 2100, sin embargo para la región insular se tiene incrementos superiores al 10% bajo el RCP 8.5 y para la DH Esmeraldas estima un incremento del orden del 10% en los finales de siglo. De la misma forma que para la temperatura, la mayor variación se reportaría en los mayores incrementos dados en la zona del Amazonas y Galápagos.

Tabla 16. Cambio porcentual (%) de la precipitación por regiones proyectado por los 4 escenarios

Elaboración: Estudiante

Fuente: Armenta Porras, 2016

| <b>2011-2040</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Costa            | 4.5            | 7.3            | 7.3            | 10.4           |
| Sierra           | 1.0            | 2.5            | 2.8            | 4.2            |
| <b>2041-2070</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
| Costa            | 10.80          | 8.8            | 12.1           | 12.1           |
| Sierra           | 2.7            | 4.7            | 5.5            | 7.5            |
| <b>2071-2100</b> | <b>RCP 2.6</b> | <b>RCP 4.5</b> | <b>RCP 6.0</b> | <b>RCP 8.5</b> |
| Costa            | 7.3            | 9.9            | 13.60          | 17.2           |
| Sierra           | 1.8            | 5.2            | 7.3            | 11.6           |

## 5.6. Modelación hidrológica bajo los escenarios de cambio climático en Hydro-BID

Para la determinación de la oferta hídrica en la cuenca de Esmeraldas, se estimó la serie de caudales para las condiciones iniciales (periodo de 1996 a 2005) y de la misma forma para las proyecciones bajo los escenarios de cambio climático mencionados con anterioridad (hasta el 2100). Esto fue posible aplicando las series de datos climatológicos ya tratados y luego integrados en el modelo de Hydro-BID, las temporalidades usualmente manejadas fueron la diaria y mensual.

Las diferencias de los resultados conseguidos indican que, para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, presenta un posible incremento de los caudales en comparación a los datos históricos durante todo el periodo de simulación. Este aumento se determinó mediante un análisis comparativo entre la mediana de los cambios proyectados en el caudal para los dos escenarios y los caudales obtenidos en condiciones actuales, todo esto para las fases comprendidas entre 2011 y 2100.

En el periodo de 2011 a 2030 se puede mencionar que posiblemente se presentará un pequeño incremento de caudal del 6,09% para el RCP 2.6 y del 13,26% para el RCP 8.5 (Gráfico 10). De otra mano, para el periodo 2041-2070 el incremento es del 13,60% y del 13,90% respectivamente (Gráfico 11). Posteriormente, en el periodo del 2071 al 2100 se predice un incremento del 9,33% y del 19,03% correspondientemente (Gráfico 12).

De forma general se halló que en el escenario más desfavorable RCP 8.5 se presenta un mayor incremento de caudal respecto al escenario menos desfavorable RCP 2.6 para los tres periodos de estudio, en especial para el 2071-2100. Por el contrario, para el periodo 2041-2070 el incremento de caudal es muy similar para el RCP 2.6 y RCP 8.5, pero las tendencias de incremento de caudales se mantienen en la cuenca de estudio a lo largo de los tres periodos y para ambos RCP, donde el periodo de mayor criticidad para los contextos climáticos proyectados es el escenario **RCP 8.5**. Los posibles incrementos de los caudales implicaran cambios sobre los aspectos ambientales, sociales y principalmente económicos de la zona de estudio, por esta razón es responsabilidad de los Gobiernos Autónomos Descentralizados y Gobierno Central diseñar destrezas y alternativas de adaptación y mitigación que ayuden a la reducción de la magnitud de los impactos.

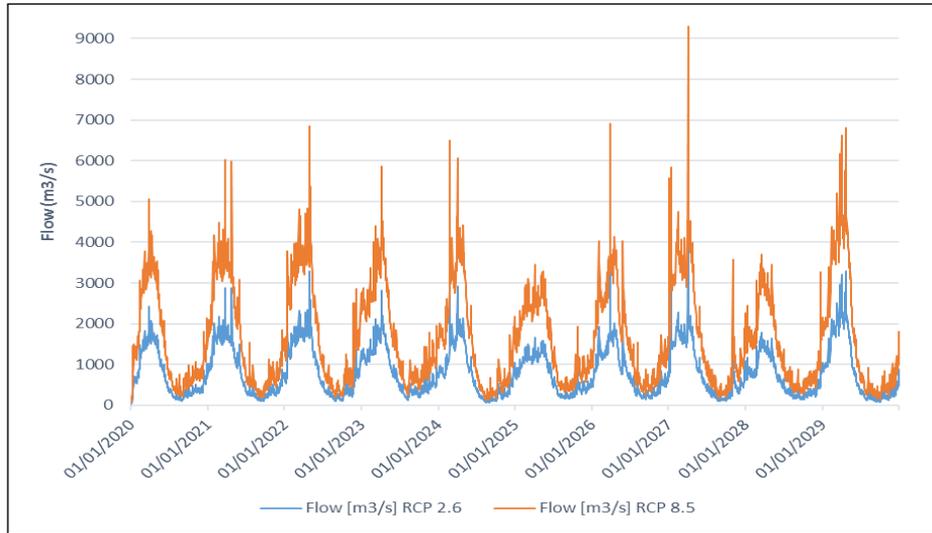


Gráfico 10. Caudales proyectados, periodo 2020-2030  
Elaboración: Estudiante

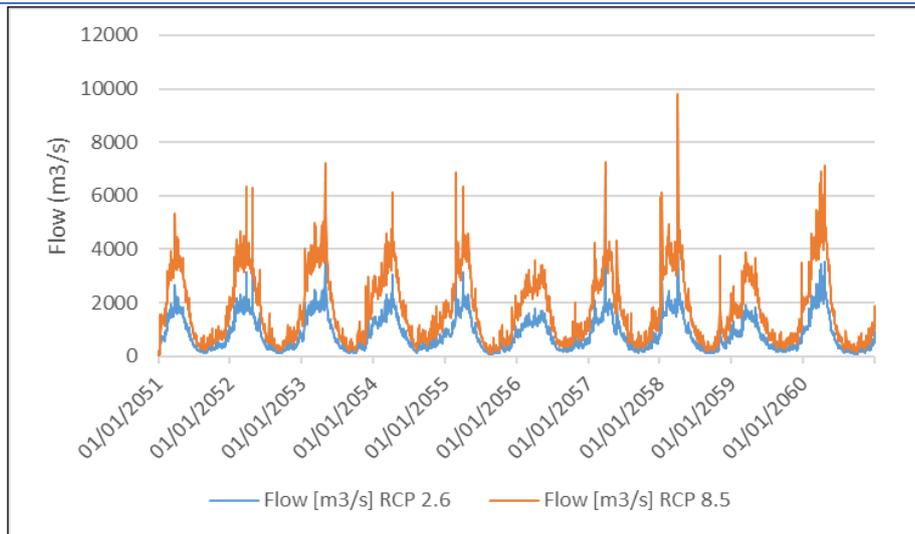


Gráfico 11. Caudales proyectados, periodo 2041-2060  
Elaboración: Estudiante

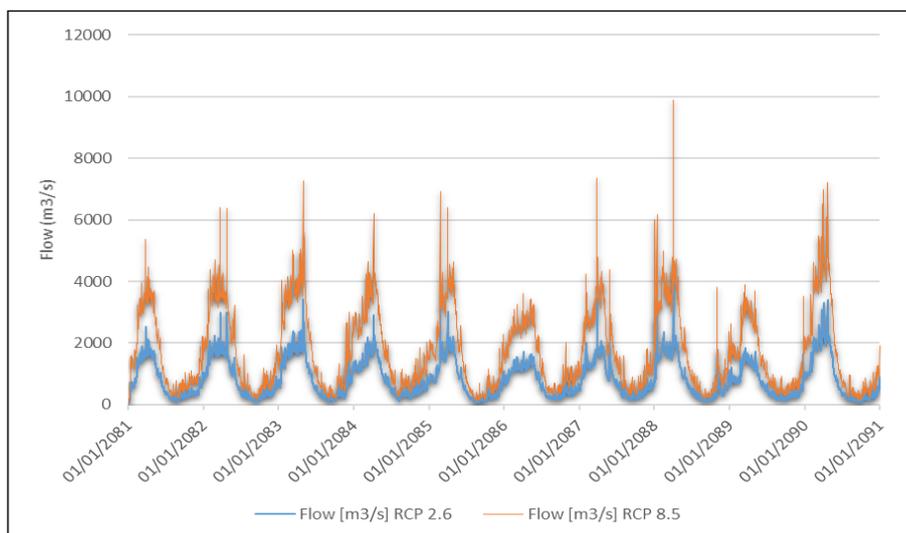


Gráfico 12. Caudales proyectados, periodo 2081-2091

Elaboración: Estudiante

### 5.7. Análisis de balance entre la oferta – demanda hídrica según escenarios

CISPDR en su trabajo del Plan Hídrico de la DH Esmeraldas, realiza el análisis de oferta y demanda considerando tres puntos de análisis 2010, 2025 y 2040. Luego, una vez construido el modelo de asignación de recursos hídricos, se crean tres escenarios de simulación relacionada con las capacidades de suministro de agua de las infraestructuras existentes y proyectadas. En el presente trabajo se tomará en cuenta dos de los ellos, en los que se realizará un análisis complementario de cambio climático, esto en base a la oferta de agua obtenidos según escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Se toma en cuenta el periodo de análisis hasta 2100 a pesar de que el Plan Hídrico propuesto por CISPDR abarca solo hasta el 2040, sin embargo, se puede realizar un análisis de las posibles consecuencias futuras según estas proyecciones climáticas.

#### 5.7.1. Escenario I

Este Escenario “tiene como objetivo evaluar la insuficiencia de la capacidad de suministro de agua de los proyectos existentes, de esta manera se proporciona la base para determinar las cantidades y la escala de Ingeniería hidráulica construida en el año horizonte del proyecto” (CISPDR, 2016). Para la oferta actual, a pesar de que en la cuenca existe tres embalses, Los Chillos, Guanpolo y Cumbayá, no se consideraron en los modelos de asignación realizado por el autor. Serán consideradas para este análisis, cierta infraestructura en la Cuenca de Guayllabamaba como explotación de aguas subterráneas en el distrito de Quito, y trabajos de abastecimiento dentro y fuera de cuenca que son utilizados para abastecimiento de cuencas fronterizas (Muisne y Guayas).

Para este escenario se ha calculado durante 40 años, tomando en cuenta tres puntos de análisis (2010, 2025 y 2040), las variables analizadas son: la cantidad de recursos hídricos, cantidad de agua transferida, el déficit y exceso de agua, todo para el año 2010 y los años horizonte en la condición promedio anual de la cuenca de estudio. El análisis se muestra en la Tabla 17, que se expone seguidamente.

Tabla 17. Análisis Oferta – Demanda, escenarios I

Elaboración: Estudiante

Fuente: CISPDR, 2016

| Información general de la cuenca de Esmeraldas bajo el escenario I (promedio anual) Unidad: Hm <sup>3</sup> |         |         |         |         |         |         |         |         |            |         |           |           |          |                    |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|-----------|-----------|----------|--------------------|
| ÍTEM  | MES     |         |         |         |         |         |         |         |            |         |           |           | TOTAL    |                    |
|   | Enero   | Febrero | Marzo   | Abril   | Mayo    | Junio   | Julio   | Agosto  | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |          |                    |
| Escorrentía Hydro-BID   | 2426.92 | 3412.68 | 4006.14 | 4318.43 | 2941.87 | 1665.39 | 822.29  | 503.29  | 448.34     | 674.90  | 885.19    | 1384.31   | 23489.74 |                    |
| Escorrentía MIKE BASIN  | 2758.5  | 3783.79 | 4262.77 | 4361.06 | 3439.5  | 2215.14 | 1653.95 | 1238.86 | 1206.38    | 1311.42 | 1387.46   | 1779.72   | 29398.55 |                    |
| La cantidad de agua transferida fuera   | 5.26    | 4.75    | 5.26    | 5.09    | 5.26    | 5.09    | 5.26    | 5.26    | 5.09       | 5.26    | 5.09      | 5.26      | 61.93    |                    |
| Demanda de agua 2010  | 83.72   | 79.07   | 79.33   | 77.15   | 91.57   | 112.68  | 128.7   | 136.35  | 119.8      | 101.15  | 95.91     | 83.34     | 1188.77  |                    |
| Suministro de agua 2010   | 79.87   | 76.56   | 78.20   | 76.95   | 89.69   | 102.29  | 105.18  | 98.44   | 94.86      | 88.67   | 87.25     | 78.10     | 1056.06  | Porcentaje déficit |
| Déficit de agua 2010  | 3.85    | 2.51    | 1.13    | 0.2     | 1.88    | 10.39   | 23.52   | 37.91   | 24.94      | 12.48   | 8.66      | 5.24      | 132.71   | 11.16%             |
| Demanda de agua 2025  | 123.23  | 112.66  | 112.61  | 107.93  | 127.97  | 155.87  | 183.94  | 204.59  | 187.31     | 162.62  | 152.93    | 125.08    | 1756.74  |                    |
| Suministro de agua 2025   | 89.3    | 85.66   | 85.25   | 82.65   | 96.83   | 109.39  | 108.99  | 99.95   | 98.14      | 95.74   | 96.37     | 85.73     | 1134.00  | Porcentaje déficit |
| Déficit de agua 2025  | 33.93   | 27      | 27.36   | 25.28   | 31.14   | 46.48   | 74.95   | 104.64  | 89.17      | 66.88   | 56.56     | 39.35     | 622.74   | 35.45%             |
| Demanda de agua 2035  | 136.8   | 124.44  | 122.46  | 116.79  | 137.93  | 169.38  | 103.69  | 232.65  | 117.23     | 188.81  | 177.09    | 138.09    | 1765.36  |                    |
| Suministro de agua 2035   | 91.36   | 88.62   | 87.03   | 83.46   | 98.32   | 112.4   | 10.62   | 100.5   | -0.55      | 98.53   | 100.04    | 88.09     | 958.42   | Porcentaje déficit |
| Déficit de agua 2035  | 45.44   | 35.82   | 35.43   | 33.33   | 39.61   | 56.98   | 93.07   | 132.15  | 117.78     | 90.28   | 77.05     | 50        | 806.94   | 45.71%             |
| Excedente de agua 2010  | 2715.32 | 3711.84 | 4222.33 | 4322.93 | 3389.87 | 2153.99 | 1586.11 | 1171.55 | 1146.67    | 1258.59 | 1337.98   | 1737.67   | 28754.85 |                    |
| Excedente de agua 2025  | 2707.57 | 3706    | 4216.51 | 4318.77 | 3384.01 | 2148.6  | 1582.73 | 1170.1  | 1144.19    | 1252.66 | 1330.96   | 1731.28   | 28693.38 |                    |
| Excedente de agua 2035  | 2705.18 | 3703.51 | 4214.31 | 4317.54 | 3382.06 | 2145.65 | 1580.87 | 1169.22 | 1142.79    | 1249.82 | 1327.62   | 1728.64   | 28667.21 |                    |

La comparativa de los resultados del flujo entre Hydro-BID y MIKE BASIN, muestra que la cantidad arrojada por Hidro-BID es el 79% del modelo MIKE BASIN modelada por CISPDR, por lo que el déficit aumentaría aún más manteniendo las demandas en el horizonte de planificación.

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior, realizando cálculos de equilibrio, la tasa de déficit hídrico para la cuenca de estudio es 35,45% y 45,71% en los horizontes de planificación con modelo MIKE BASIN y de 17.16% a 49.08% según oferta estimada con Hydro-BID.

Cabe destacar que este déficit hace relación a la ausencia de obras de abastecimiento de agua, pues el volumen promedio anual de la cuenca en el año más seco entre el periodo de 1997 y 2005, es de 19288,83 hm<sup>3</sup>, mientras que la demanda de agua para el 2010 de todos los usos consuntivos apenas resultó ser de 1544.55 hm<sup>3</sup>, lo que demuestra que el problema a resolver es respecto al suministro. Sin embargo, los escasos continúan siendo graves también por la desigualdad en la distribución del agua, el aumento en la demanda, poco o nulo control de la escorrentía, proyectos insuficientes y poco apoyo gubernamental. Dentro de los usos, la agricultura sufre más la escasez de agua.

Finalmente, el modelo Hidro-BID considerando las proyecciones climáticas bajo los escenarios RCP 2.6 y 8.5 arrojan resultados de incremento de caudales anuales desde 6.09% hasta 19.03%, para RCP 2.6 entre el periodo de 2011-2040 y RCP 8.5 entre 2071-2100 respectivamente. Con lo que se puede concluir que mientras no exista nuevas construcciones de embalses grandes y medianos que regulen y permitan tener almacenamiento más amplio para gestionar y ahorrar agua, no podrá mejorar la situación de desbalance. De la misma manera es necesario aumentar las instalaciones de suministro de agua. En caso de no realizar estas medidas estructurales, con el cambio climático se agudizará el problema de desequilibrio estacional en la disponibilidad del agua.

### **5.7.2. Escenario II**

Para este análisis el CISPDR (2016) considera nuevos suministros de agua, la construcción de embalses grandes y medianos con mayor regulación y almacenamiento, y la explotación racional del agua subterránea, todo para mejorar la capacidad actual de suministro y análisis del balance de la demanda de agua en los años horizonte del país. El análisis del balance se realiza basándose en el análisis del Escenario I., donde en base al cálculo y análisis del exceso y déficit hídrico, se realizó el análisis del nivel estándar de satisfacción de la tasa de

garantía de suministro de agua para el uso consuntivo, y los proyectos terminados se comprueban para determinar si se puede satisfacer la demanda de suministro de agua en los años horizonte de planificación. Los embalses planificados según CISPDR relacionados con la cuenca de estudio son Quinindé-Río Canande, Lelia-Río Toachi, Corazón\_Río Pilatón, E.E. Quito-Río San Pedro, Guápulo-Río Machángara, Recuperadora-Qda. Huarmihuaycu, Guachal-Río Guachal, Intag 1-Río Cristopamba, Vacas Galindo 1-Río Apuela, Perlabí-Río Perlav, Machachi-Río San Pedro, El Carmen-Quebrada del Carmen y El Piñán-Río el Piñán. Se recalculan las demandas con los mismos criterios de la sección 5.4.

Seguidamente se muestra los detalles del balance en los años horizontes de planificación en la Tabla 18, esto considerando las medidas estructurales antes mencionadas.

Tabla 18. Análisis Oferta – Demanda, escenarios II

Fuente: CISPDR, 2016

| Información general de la cuenca de Esmeraldas bajo el escenario II (promedio anual) Unidad: Hm3 |         |         |         |         |         |         |         |         |            |         |           |           |          |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|-----------|-----------|----------|
| ÍTEM   | MES     |         |         |         |         |         |         |         |            |         |           |           | TOTAL    |
|  | Enero   | Febrero | Marzo   | Abril   | Mayo    | Junio   | Julio   | Agosto  | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |          |
| Escorrentía Hydro-BID RCP 2.6 2011-2040  | 2576.99 | 3605.73 | 4225.48 | 4549.66 | 3108.17 | 1772.38 | 883.09  | 542.66  | 484.76     | 724.65  | 951.19    | 1486.77   | 24911.53 |
| Escorrentía Hydro-BID RCP 8.5 2011-2040  | 2754.03 | 3839.66 | 4493.75 | 4832.97 | 3305.94 | 1894.49 | 950.56  | 585.64  | 524.10     | 780.14  | 1025.47   | 1602.66   | 26589.41 |
| Escorrentía MIKE BASIN   | 2758.5  | 3783.79 | 4262.77 | 4361.06 | 3439.5  | 2215.14 | 1653.95 | 1238.86 | 1206.38    | 1311.42 | 1387.46   | 1779.72   | 29398.55 |

| AÑO HORIZONTE | Total                 |                          |                       |                           |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
|               | Demanda de agua (hm3) | Suministro de agua (hm3) | Déficit de agua (hm3) | Porcentaje de déficit (%) |
| 2025          | 1759.19               | 1643.27                  | 115.94                | 6.59%                     |
| 2035          | 1967.36               | 1817.33                  | 150.03                | 7.63%                     |

| CUENCA       | AÑO HORIZONTE | Usuarios de agua urbana |                           |                         |                           |                        |                           | Usuarios de agua de riego |                           |                       |                           |
|--------------|---------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|              |               | Población Urbana        |                           | Espacios verdes Urbanos |                           | Industrias y servicios |                           | RGSA                      |                           | RPAE                  |                           |
|              |               | Déficit de agua (hm3)   | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3)   | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3)  | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3)     | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3) | Porcentaje de déficit (%) |
| Esmeraldas   | 2025          | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         | 0                      | 0                         | 7.17                      | 14.1                      | 21.87                 | 13.6                      |
|              | 2035          | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         | 0.01                   | 0                         | 12.23                     | 13.4                      | 31.13                 | 13.3                      |
| Guayllabamba | 2025          | 0                       | 0                         | 0.03                    | 0.1                       | 14.14                  | 2.7                       | 33.99                     | 12.3                      | 11.07                 | 13.8                      |
|              | 2035          | 0                       | 0                         | 0.2                     | 0.4                       | 21.1                   | 3.7                       | 61.46                     | 16                        | 10.33                 | 11.3                      |

| CUENCA       | AÑO HORIZONTE | Otros usuarios de agua |                           |                       |                           |                       |                           |                       |                           |
|--------------|---------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|              |               | Población rural        |                           | RGSA                  |                           | RPAE                  |                           | Industria             |                           |
|              |               | Déficit de agua (hm3)  | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3) | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3) | Porcentaje de déficit (%) | Déficit de agua (hm3) | Porcentaje de déficit (%) |
| Esmeraldas   | 2025          | 0.01                   | 0                         | 8.69                  | 14.3                      | 4.11                  | 13.3                      | 0                     | 0                         |
|              | 2035          | 0.01                   | 0.1                       | 5.82                  | 14.9                      | 1.52                  | 13.3                      | 0                     | 0                         |
| Guayllabamba | 2025          | 0                      | 0                         | 10.62                 | 13                        | 1.23                  | 13.2                      | 0                     | 0                         |
|              | 2035          | 0                      | 0                         | 5.34                  | 14                        | 0.86                  | 13.1                      | 0                     | 0                         |

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados con este escenario, las zonas bajas de la cuenca son favorecidos con la construcción de embalses de regulación y almacenamiento, pues a la medida que se acerca al noroeste de la cuenca, la presencia de las precipitaciones aumentan por lo que la esorrentía de los ríos es relativamente estable y además al ser terreno plano permite la implementación de las obras de desvió para los diversos usos, en especial durante los meses con menor producción (julio a diciembre). Los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5 en los horizontes de planificación indican aumento de temperatura y precipitación, con lo que la esorrentía producida en esta área preocupa mayormente desde el punto de vista de las inundaciones y el tema de falta de medidas estructurales son justificadas aún más.

No se puede esperar el mismo comportamiento en toda el área de estudio, debido a que las zonas de inicio o zonas altas de la cuenca, como el caso de Quito que representa una zona montañosa (sureste de la cuenca)- Según CISPDR (2016), habrá escasez de agua en especial el sector industrial y servicio, de la misma manera las zonas de riego relacionadas con la cuenca de Guayllabamba. Esta situación se entiende debido a que por condiciones topográficas las medidas estructurales no se pueden implementar fácilmente, además las zonas con problema están ubicadas en zonas con pocas precipitaciones, también concentran mayor parte de la población y carecen de obras hidráulicas. Por tal razón el distrito metropolitano mantiene en pie los proyectos de transferencia de agua desde la demarcación hidrográfica de Napo para solucionar el desabastecimiento en épocas de estiaje y sostener el incremento de la demanda en general. De todas maneras, la implementación de obras hidráulicas acompañado de técnicas que mejoren la eficiencia de uso del agua es la mejor opción para la cuenca de estudio en general.

## **6. DISCUSIÓN**

La modelación de la cuenca de Esmeraldas ha significado un reto debido a su extensión y configuración, los limitados datos hidrometereológicos distribuidos en el área de estudio, la diversidad de usuarios del agua y diversidad climática. Matemáticamente los parámetros de calibración aún deben ser mejorados, en especial el parámetro de volumen de error total (Overall volumen error) y la Correlación (R) de 0.7.

Sin embargo, frente a la presente escases de datos, los modelos matemáticos permiten obtener proyecciones aceptables usando los datos satelitales o de reanálisis. También hay que destacar que con Hydro-BID existe la facilidad de realizar escenarios de cambio climático, para lo cual los datos de entrada son obtenidos de otro modelo matemático,

demostrando de esta manera la utilidad de la base de datos AHD y el modelo Lluvia-Escorrentía (GWLF) de Hydro-BID. Con todo lo anterior queda demostrado que los modelos matemáticos suplen adecuadamente la carencia de datos obtenidos mediante medición en campo.

Al respecto del análisis del impacto del cambio climático en la zona de estudio, podemos mencionar que el trabajo realizado por CISPDR en cuanto a la elaboración de Plan Hídrico para DH Esmeraldas está bien concebido; el presente estudio ratifica las necesidades de implementación de las medidas estructurales, ya que los dos escenarios de cambio climático RCP 2.6 y 8.5 muestran que los meses de estiaje y los meses lluviosos mantienen su estacionalidad. Los incrementos en los volúmenes promedio mensuales y anuales deben ser regulados y bien distribuidos en toda el área, además de esto en la zona alta de la cuenca requiere medidas estructurales aún más extremas como los trasvases.

## **7. CONCLUSIONES**

Con la carencia de datos hidrometeorológicos, el proceso de reducción de escala realizado a los datos históricos permite rellenar estos vacíos y la representación de las situaciones reales de la zona de estudio cada vez es más acertada.

El modelo lluvia escorrentía de Hydro-BID estima de mejor manera los caudales para series mensuales y anuales, pero generalmente no sucede lo mismo para series diarias, para mejorar este ajuste de esta serie se requiere datos de entrada de mayor exactitud, de todas formas, los resultados formados para la temporalidad mensual son tolerables, manteniendo los volúmenes de caudal justificados en la curva de duración de flujo.

Bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 y para el periodo comprendido entre 2011 y 2100, en la cuenca de Esmeraldas se espera un incremento en el caudal disponible de entre 6.09% y 13.60% para el escenario RCP 2.6 y entre el 13.26% y el 19.03% para el escenario RCP 8.5, en donde el periodo de mayor incremento de caudal estará comprendido entre los años 2071 a 2100.

Los aspectos sociales y económicos de la zona de la DH Esmeraldas se verán afectados por los mencionados incrementos en los caudales, que combinando con la posible generación de una demanda insatisfecha puede provocar a que la cuenca entre en una etapa de riesgo, esto es debido al desequilibrio estacional del recurso agua, es decir, existe agua suficiente que requiere ser regulada y almacenada en los meses de invierno, para suplir necesidades en épocas de estiaje y también se requiere desviar el agua hacia zonas de mayor déficit hídrico, para lo cual las medidas estructurales son la mejor opción.

CISPDR obtiene resultados de la simulación que evidencian la demanda insatisfecha aún con proyectos de embalse en la zona alta de la cuenca, esta zona requiere proyectos de mayor envergadura como los trasvases, los incrementos de caudal obtenidos en la modelación del cambio climático para el periodo de 2011 a 2100 van a la par al incremento de la demanda. Esto ratifica que el escenario con menor demanda insatisfecha no depende mucho del cambio climático, a lo contrario, depende de la manera como se distribuye la producción del agua dentro y fuera de la Cuenca.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Armenta Porras, G. E. (2015). *Evaluación de los resultados de las proyecciones de clima obtenidas a través de la reducción de escala estadística y a través del método de ensamble de confiabilidad ponderada (REA) para la elaboración de los escenarios de cambio climático para Ecuador*. Quito.
- Armenta Porras, G. E., Villa Cedeño, J. L., & Jácome, P. S. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*. Quito.
- Banco Central del Ecuador. (2017). *Información Estadística Mensual N0. 1990*. Quito.
- Cabrera, J. (2015). *Modelos Hidrológicos*. Lima.
- Centro Cambio Global\_Universidad Católica de Chile. (2009). *Guía Metodológica - Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Santiago, Boston.
- CISPDR. (2016). *Planificación Hídrica Nacional del Ecuador*. Quito.
- Fekadu, M., Miralles, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2*.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2013). *Cambio Climático*. Ginebra.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (febrero de 2018). *Datos Meteorológicos e Hidrológicos*. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/>
- Lux Carnoda, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de cuencas Hidrográficas. Recuperado abril de 2020, de: [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20). (s.f.).
- Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. En Centro para el conocimiento del paisaje, IMDEA, & CIVILSCAOE, *Cuadernos de Geomática* (págs. 16,17). Alcalá de Henares.
- Pesca, M. d. (2000). *III Censo Nacional Agropecuario*.
- Pimiento Castañeda, M., & Restrepo Caicedo, L. (2018). *Calculo-Demana hídrica en la Cuenca del río Gualí bajo escenarios del cambio climático*. Bogotá.

SEMPLADES. (2013). *Plan Nacional Para el Buen Vivir*. Quito.

## ANEXO 1.1

### “ESTACIONES HIDROMETERIOLÓGICAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO”

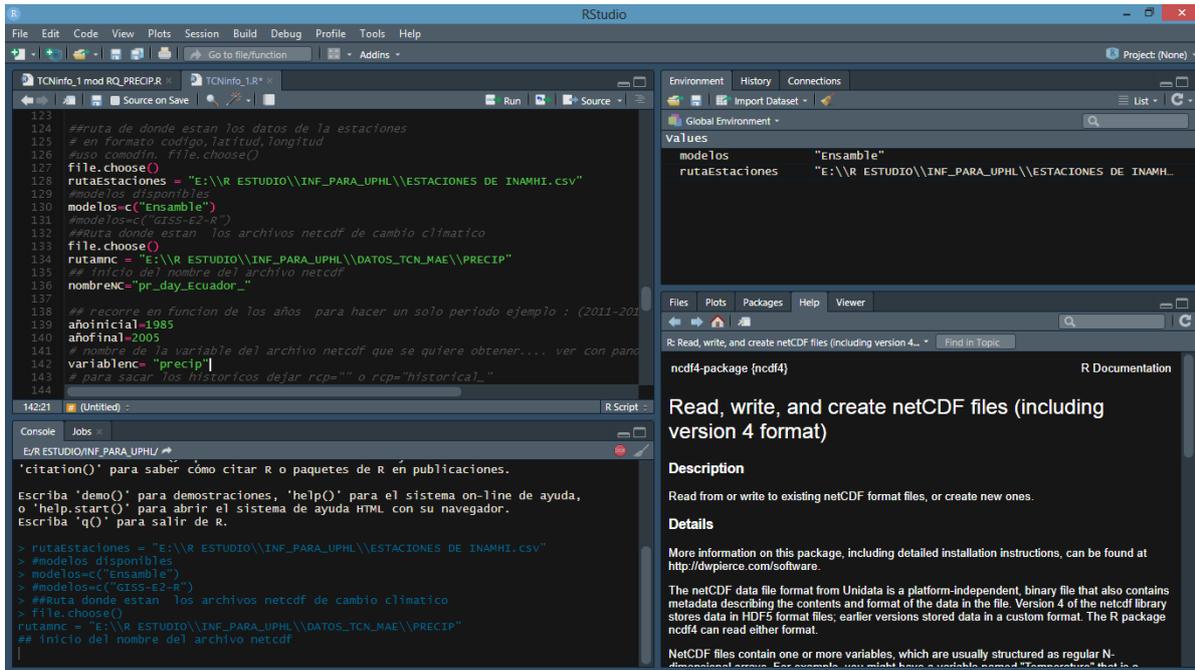
#### CUENCA DE ESMERALDAS Y GUAYLLABAMBA

| Station | Latitude    | Longitude   |
|---------|-------------|-------------|
| M343    | -0.10194444 | -78.3033333 |
| M345    | -0.09805556 | -78.4205556 |
| M361    | -0.07305556 | -78.5727778 |
| M009    | -0.05972222 | -78.2002778 |
| M344    | -0.05694444 | -78.1669444 |
| M358    | 0.00138889  | -78.5125    |
| M359    | 0.05388889  | -78.1391667 |
| M339    | 0.06666667  | -78.6763889 |
| M337    | 0.16888889  | -78.3930556 |
| M325    | 0.23444444  | -78.6269444 |
| M326    | 0.24638889  | -78.5766667 |
| M909    | 0.32055556  | -78.4080556 |
| M318    | 0.35472222  | -78.5133333 |
| M153    | 0.61472222  | -80.0241667 |
| M120    | -0.62305556 | -78.5813889 |
| M364    | -0.56138889 | -78.4263889 |
| M353    | -0.42722222 | -78.4155556 |
| M362    | -0.42555556 | -78.965     |
| M113    | -0.38805556 | -78.5252778 |
| M003    | -0.36666667 | -78.5497222 |
| M354    | -0.28444444 | -78.6322222 |
| M348    | -0.23055556 | -79.2483333 |
| M002    | -0.22916667 | -78.3666667 |
| M116    | -0.21055556 | -78.7816667 |
| M335    | -0.20166667 | -78.5347222 |
| M024    | -0.16666667 | -78.4830556 |
| M357    | -0.16444444 | -78.5222222 |
| M346    | -0.15944444 | -78.3152778 |
| M167    | -0.196666   | -80.26444   |
| M889    | -0.531666   | -79.1219444 |
| M367    | -1.1405555  | -79.025833  |
| M369    | -1.0713888  | -78.7025    |
| M188    | -0.34722    | -78.144444  |
| M324    | 0.29805555  | -77.911666  |
| M301    | 0.608055    | -78.1363888 |
| M154    | 0.857777    | -78.9619    |
| M315    | 0.389444    | -78.94083   |
| M0156   | 0.316111    | -79.468889  |
| M0168   | 0.063806    | -80.050222  |
| M5042   | -0.015      | -78.45306   |

|       |           |            |
|-------|-----------|------------|
| M0025 | -0.024722 | -79.380278 |
| M0026 | -0.476111 | -79.338888 |
| M5149 | -0.4593   | -78.7547   |
| M0117 | -0.524167 | -78.540556 |
| M0001 | 0.258333  | -78.400833 |

## ANEXO 1.2

# “SOFTWARE RSTUDIO CON EL SCRIPT PARA OBTENCIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS”



## DATOS\_TCN\_MAE SOBRE PRECIPITACIONES

|  |  |
|--|--|
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_2001.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_2002.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_2003.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_2004.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_2005.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1981.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1982.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1983.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1984.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1985.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1986.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1987.nc |
| <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1988.nc | <br>pr_day_Ecuador_Ensamble_1989.nc |



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1990.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1991.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1992.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1993.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1994.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1995.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1996.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1997.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1998.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1999.nc



pr\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2000.nc

### **DATOS\_TCN\_MAE SOBRE TEMPERATURAS**



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1981.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1982.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1983.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1984.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1985.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1986.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1987.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1988.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1989.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1990.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1991.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1992.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1993.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1994.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1995.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1996.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1997.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1998.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_1999.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2000.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2001.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2002.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2003.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2004.nc



tas\_day\_Ecuador\_Ensamble\_2005.nc

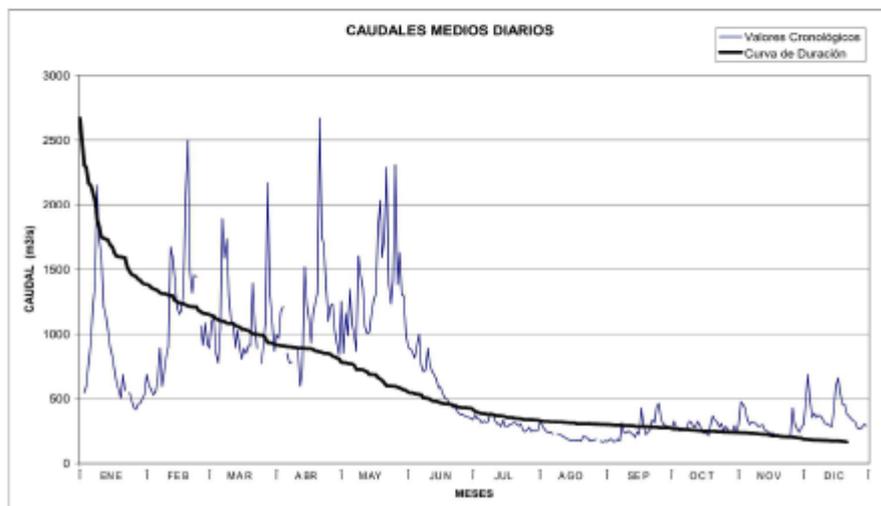
### ANEXO 1.3

## “ANUARIO HIDROLÓGICO TIPO-PARA LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICAS DE ESTUDIO ESTACIÓN ESMERALDAS DJ SADE”

CAUDALES MEDIOS DIARIOS (m<sup>3</sup>/s)

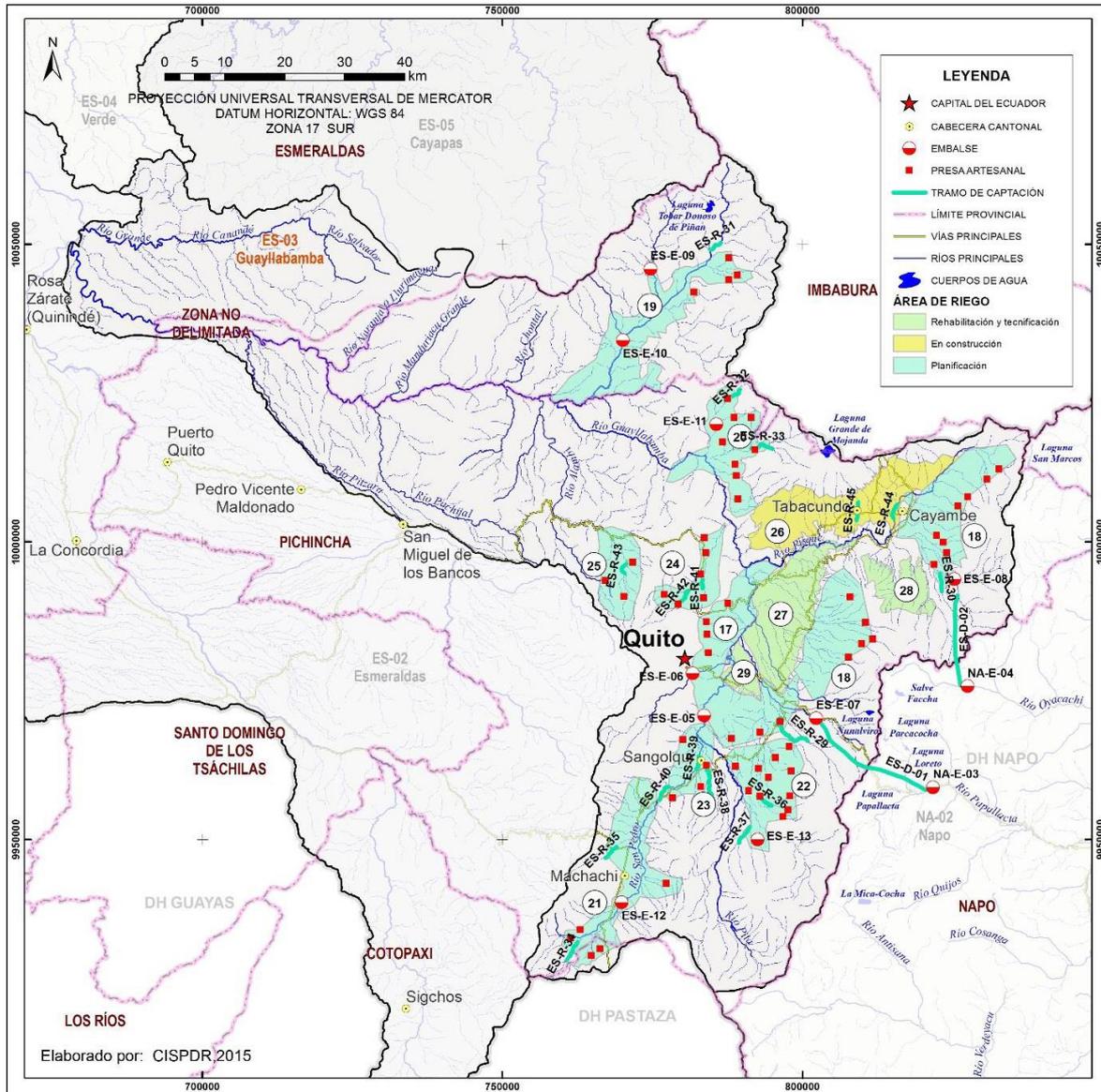
| 2004         |                    |            |            |            |            |            |           |           |           |           |           |           |
|--------------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| H168         | ESMERALDAS DJ SADE |            |            |            |            |            |           |           |           |           |           |           |
| DIA          | ENE                | FEB        | MAR        | ABR        | MAY        | JUN        | JUL       | AGO       | SEP       | OCT       | NOV       | DIC       |
| 1            |                    | 696.456 *  | 891.763 *  | 995.836 *  | 1290.856 * | 897.110 *  | 338.761 * | 322.286 * | 171.733 * | 291.119 * | 296.740 * | 300.262 * |
| 2            |                    | 597.129 *  | 1095.768 * | 967.883 *  | 852.499 *  | 886.765 *  | 377.900 * | 295.618 * | 162.293 * | 325.613 * | 474.625 * | 462.479 * |
| 3            | 546.848 *          | 577.251 *  | 1141.531 * | 1174.164 * | 1160.927 * | 862.451 *  | 346.008 * | 295.521 * | 167.655 * | 284.223 * | 457.595 * | 667.410 * |
| 4            | 698.817 *          | 529.607 *  | 858.764 *  | 1212.776 * | 989.309 *  | 815.182 *  | 342.162 * | 246.238 * | 168.289 * | 257.995 * | 426.376 * | 485.383 * |
| 5            | 769.075 *          | 550.096 *  | 778.451 *  |            | 1345.318 * | 903.055 *  | 313.165 * | 241.218 * | 172.560 * | 248.356 * | 337.357 * | 366.585 * |
| 6            | 934.480 *          | 640.759 *  | 1037.291 * | 850.489 *  | 1082.431 * | 998.180 *  | 327.636 * | 240.033 * | 168.574 * | 270.868 * | 300.299 * | 387.024 * |
| 7            | 1214.563 *         | 891.740 *  | 1891.401 * | 778.451 *  | 993.696 *  | 761.536 *  | 317.845 * | 227.782 * | 176.931 * | 252.536 * | 320.536 * | 355.967 * |
| 8            | 1378.201 *         | 597.129 *  | 1588.500 * | 784.135 *  | 868.571 *  | 707.884 *  | 322.638 * |           |           |           |           |           |
| 9            | 2150.611 *         | 724.003 *  | 1733.974 * |            | 1602.117 * | 722.832 *  | 392.360 * | 229.909 * | 238.926 * | 325.090 * | 307.480 * | 365.452 * |
| 10           | 1728.422 *         | 825.231 *  | 1297.698 * | 898.703 *  | 1461.423 * | 891.015 *  | 387.034 * | 224.792 * | 238.937 * | 320.354 * | 284.214 * | 359.623 * |
| 11           | 1596.655 *         | 901.385 *  | 1101.531 * | 890.810 *  | 1390.314 * | 770.941 *  | 337.245 * | 215.909 * | 250.437 * | 282.161 * | 299.946 * | 306.069 * |
| 12           | 1210.529 *         | 1672.567 * | 1061.042 * | 690.509 *  | 1055.112 * | 713.384 *  | 307.209 * | 207.215 * | 237.952 * | 285.359 * | 290.437 * | 306.046 * |
| 13           | 1139.576 *         | 1599.031 * | 894.624 *  | 724.003 *  | 1002.450 * | 888.398 *  | 307.293 * | 194.991 * | 224.811 * | 325.090 * | 263.310 * | 296.591 * |
| 14           | 1037.291 *         | 1424.837 * | 1030.952 * | 1517.468 * | 1017.616 * | 852.985 *  | 285.340 * | 184.044 * | 202.357 * | 295.591 * | 250.437 * | 282.022 * |
| 15           | 899.272 *          | 1209.937 * | 905.602 *  | 1225.219 * | 1150.755 * | 585.478 *  | 335.979 * | 180.487 * | 242.132 * | 249.394 * | 237.952 * | 401.295 * |
| 16           | 828.690 *          | 1153.295 * | 807.304 *  | 1118.368 * | 1258.891 * | 590.428 *  | 283.088 * | 178.714 * | 228.853 * | 231.815 * | 230.814 * | 599.620 * |
| 17           | 726.182 *          | 1179.140 * | 887.552 *  | 932.465 *  | 1312.989 * | 540.442 *  | 283.088 * | 177.840 * | 428.769 * | 240.106 * | 233.162 * | 661.807 * |
| 18           | 822.171 *          | 1337.564 * | 852.422 *  | 1157.860 * | 1629.493 * | 501.829 *  | 301.365 * | 180.487 * | 288.765 * | 214.959 * | 210.094 * | 536.732 * |
| 19           | 967.569 *          | 2063.832 * | 909.198 *  | 1241.171 * | 2034.571 * | 495.909 *  | 305.055 * | 177.813 * | 222.822 * | 304.254 * | 214.931 * | 498.964 * |
| 20           | 906.411 *          | 2500.607 * | 909.437 *  | 1313.078 * | 1593.372 * | 448.105 *  | 316.960 * | 173.434 * | 242.132 * | 367.529 * | 204.362 * | 456.174 * |
| 21           | 687.278 *          | 1485.418 * | 1394.587 * | 2671.300 * | 1740.535 * | 446.090 *  | 307.199 * | 208.175 * | 260.196 * | 336.021 * | 216.277 * | 363.067 * |
| 22           | 964.380 *          | 1319.823 * | 1059.883 * | 1749.428 * | 2290.289 * | 430.540 *  | 291.040 * | 203.466 * | 338.482 * | 321.447 * | 207.234 * | 367.454 * |
| 23           |                    | 1454.017 * | 886.824 *  | 1689.862 * | 1385.958 * | 433.368 *  | 302.584 * | 198.708 * | 315.538 * | 280.850 * | 201.524 * | 348.441 * |
| 24           | 545.342 *          | 1445.684 * |            | 1390.286 * | 1236.648 * | 396.341 *  | 261.119 * | 174.311 * | 436.291 * | 306.032 * | 196.957 * | 329.897 * |
| 25           | 480.920 *          |            | 774.628 *  | 1190.159 * | 1414.689 * | 380.516 *  | 246.220 * | 179.610 * | 462.000 * | 251.484 * | 222.262 * | 320.264 * |
| 26           | 430.549 *          | 1064.140 * | 915.542 *  | 1219.145 * | 2307.013 * | 380.441 *  | 254.950 * | 180.474 * | 349.031 * | 284.409 * | 439.369 * | 275.308 * |
| 27           | 416.880 *          | 915.455 *  | 1083.293 * | 1234.187 * | 1383.418 * | 370.075 *  | 278.779 * | 185.849 * | 301.369 * | 262.212 * | 304.915 * | 265.521 * |
| 28           | 460.641 *          | 1064.740 * | 2167.389 * | 1026.634 * | 1629.723 * | 361.077 *  | 246.220 * |           | 293.436 * | 238.990 * | 265.521 * | 275.308 * |
| 29           | 469.139 *          | 921.633 *  | 1310.247 * | 927.884 *  | 1300.057 * | 355.995 *  | 257.062 * | 174.302 * | 286.564 * | 249.394 * | 242.058 * | 301.663 * |
| 30           | 505.959 *          |            | 1112.419 * | 842.756 *  | 1296.443 * | 350.950 *  | 249.394 * | 164.838 * | 275.308 * | 291.523 * | 276.851 * | 291.040 * |
| 31           | 533.081 *          |            | 870.669 *  |            | 998.253 *  |            | 254.654 * | 174.357 * |           | 239.618 * |           |           |
| Caudal Max   |                    |            |            |            | 2913.711 * | 1028.478 * | 399.618 * |           | 551.510 * | 377.825 * | 517.113 * |           |
| Día          |                    |            |            |            | 26         | 6          | 9         |           | 17        | 20        | 2         |           |
| Hora         |                    |            |            |            | 7          | 7          | 17        |           | 7         | 18        | 18        |           |
| Caudal Min   |                    |            |            |            | 696.549 *  | 344.667 *  | 237.933 * |           | 166.534 * | 210.090 * | 187.655 * |           |
| Día          |                    |            |            |            | 2          | 30         | 26        |           | 1         | 16        | 24        |           |
| Hora         |                    |            |            |            | 18         | 7          | 7         |           | 7         | 7         | 7         |           |
| Caudal Medio | 841.055            | 1120.802   | 1109.119   | 1149.472   | 1361.149   | 611.241    | 305.756   | 207.187   | 263.947   | 280.007   | 283.770   | 366.495   |

NOTA: \*CALCULADO CON DATOS LIMNIMÉTRICOS



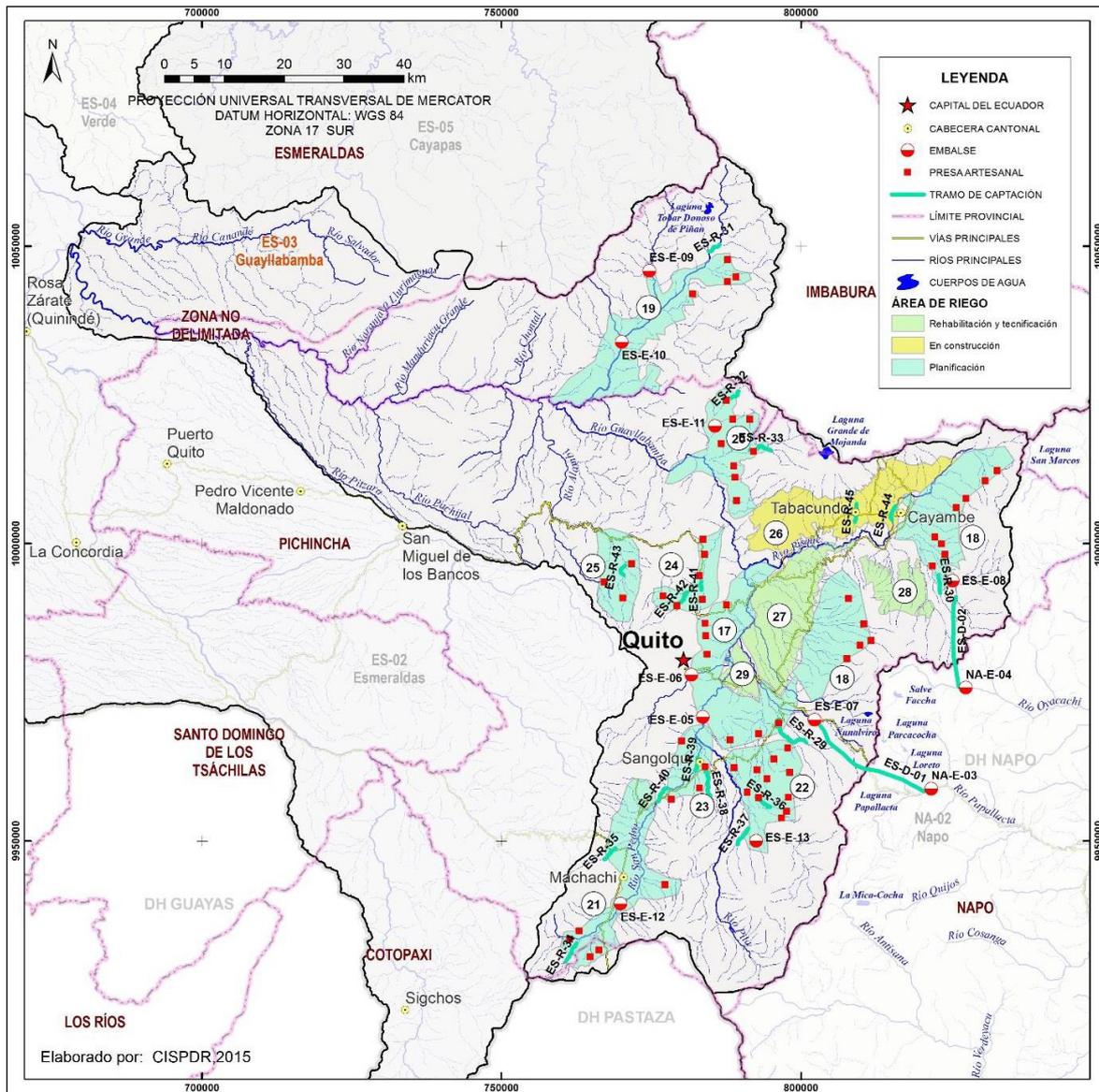
## ANEXOS 1.4

### “PROYECTOS HÍDRICOS DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO”



Mapa del Proyecto Hídrico de la Cuenca de Esmeraldas

CISDPR, 2015



Mapa del Proyecto Hídrico de la Cuenca de Guayllabamba  
CISDPR, 2015