



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Impactos acumulativos por la implementación de
PCH's sobre la cuenca del rio San Andrés en el
municipio de San Andrés de Cuerquía**

**Cumulative impacts of the implementation of PCH's
on the San Andrés river basin in the municipality of
San Andrés de Cuerquía**

Esneider Ardila Poveda

Liseth Yamilt Garavito Rendón

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2020



**Impactos acumulativos por la implementación de PCH's sobre
la cuenca del rio San Andrés en el municipio de San Andrés de
Cuerquí**

Esneider Ardila Poveda

Liseth Yamilt Garavito Rendón

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor

Libardo Antonio Londoño Ciro, PhD

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia

2020

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.....	19
Tabla 2.....	28
Tabla 3.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	16
Figura 2	17
Figura 3	18
Figura 4	31
Figura 5	32
Figura 6	33
Figura 7	33
Figura 8	34
Figura 9	35
Figura 10	36
Figura 11	36
Figura 12	37
Figura 13	38
Figura 14	39
Figura 15	39
Figura 16	40
Figura 17	41
Figura 18	42
Figura 19	42

RESUMEN

El municipio de San Andrés de Cuerquía, norte de Antioquia, está considerado con un alto potencial hidroenergético, que por el contexto mundial y del país, en términos sociales y económicos, busca ser aprovechado por medio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – PCH, y como toda intervención antrópica sucede que tiene impactos sobre el ambiente, positivos y negativos, en algunos casos se pueden acumular si se presentan proyectos del mismo tipo, como posiblemente se puede presentar para esta zona, el problema que se observa es la afectación sobre el ciclo hídrico, por parte de los proyectos PCH's San Andrés, La Chorrera, Chorreritas, La Gloria y Cañaduzal, sobre la cuenca del río San Andrés, lo cual puede disminuir la disponibilidad y cantidad de agua, así como puede provocar variaciones en las condiciones climáticas en el municipio; por lo tanto, se realiza la exploración bibliográfica frente a los componentes de las dinámicas climáticas, con el fin de construir una revisión de posibles impactos acumulativos producto de la implementación de proyectos PCH, considerando como factores del enfoque el cálculo del balance hídrico, los postulados de Budyko y el término residual de discrepancia, como determinante de impactos antrópicos que afectan la oferta hídrica superficial, para lo cual se tiene en cuenta el ciclo hidrológico se desarrolla en el tiempo y el espacio, el proceso de identificación de impactos acumulativos consiste en varios pasos que incluyen la construcción de un mapa de comportamiento de la precipitación usando las herramientas de interpolación del programa ArcGis, así como el mapa de comportamiento de la evapotranspiración, y el mapa de evaporación de laminas de agua construido con ayuda del programa Hec-Ras con base en la proyección de 16 escenarios, teniendo como factor diferenciador la modelación hidráulica de diferentes caudales (ecológico y medio) con ayuda de la herramienta Hec-Ras y los tramos establecidos para el uso del recurso hídrico por cada una de las PCH. Finalmente, considerando la disminución de la lámina de agua, producto de la intervención antrópica, la precipitación y la evapotranspiración, se realizó la implementación de la ecuación de balance hídrico según Budyko, que nos presentara para cada escenario la oferta hídrica superficial, permitiendo diferenciar las áreas en las cuales se encuentra una disminución de la evaporación, por la diferencia entre láminas de agua, sobre todo entre los escenarios que simulan una actividad normal de la zona de estudio y los que presentan los tramos afectados, un análisis del mapa de oferta hídrica superficial permite concebir la interrelación entre el ciclo hidrológico y los

componentes climáticos, tras afectar un elemento esencial como lo es la evaporación, este elemento permitió identificar el impacto acumulado de la posible implementación de estos proyectos.

Palabras clave: Balance Hídrico, Evaporación, Análisis Espacial, Hidrología, Oferta Hídrica Superficial, Precipitación, Evapotranspiración Real, Término residual de discrepancia

ABSTRACT

The municipality of San Andrés de Cuerquía, north of Antioquia, is considered to have a high hydro-energy potential, which, due to the world and country context, in social and economic terms, seeks to be exploited through Small Hydroelectric Plants - PCH, and like all anthropic intervention happens that it has positive and negative impacts on the environment, in some cases they can accumulate if projects of the same type are presented, as may possibly be presented for this area, for the case of study the main effect on the cycle is observed hydric, on the part of the PCH's San Andrés, La Chorrera, Chorreritas, La Gloria and Cañaduzal, on the San Andrés river basin; therefore, the bibliographic exploration is carried out against the components of the climatic dynamics, in order to construct a review of possible cumulative impacts resulting from the implementation of PCH projects, considering the calculation of the water balance as the factors of the approach, the postulates of Budyko, and the residual term of discrepancy, as a determinant of anthropic impacts that affect the surface water supply, for which a behavior map of precipitation is constructed using the interpolation tools of the ArcGis program, as well as the behavior map of Evapotranspiration, based on the precipitation map obtained and the DEM obtained from the study area, with these maps as a basis, different scenarios were built, taking as a differentiating factor the areas of the resulting sheets of water after hydraulic modeling of different flows (ecological and medium) with the help of the Hec-Ras tool, according to the sections and established for the use of water resources by each of the PCH. Finally, considering the decrease in the water layer, product of the anthropic intervention, and the implementation of the water balance equation according to Budyko, an analysis of the surface water supply map is carried out, which allows us to conceive the interrelation between the hydrological cycle and the climatic components, after affecting an essential element such as evaporation, with the decrease in the amount of water evaporated in the sections affected by the PCH's projects, as well as their interaction with precipitation and evapotranspiration, this element allowed to identify the accumulated impact of the possible implementation of these projects.

Keywords: Water Balance, Evaporation, Spatial Analysis, Hydrology, Surface Water Supply, Precipitation, Actual Evapotranspiration, Evaporation, Discrepancy residual term

1 Introducción.

El panorama energético del país se ha visto influenciado por el crecimiento económico y social del mundo, en políticas globalizadoras que han aumentado el uso de equipos electrónicos en la sociedad, de tal forma que el consumo de energía eléctrica ha aumentado drásticamente, lo que causa que se observe una mayor demanda, para cumplir con esta, el país le apuesta a fuentes de energía no convencional, entre estas se encuentra la hidroenergética, como una de las grandes soluciones y oportunidades de negocio, teniendo en cuenta el potencial hídrico del país, el cual está determinado por su ubicación y las condiciones geomorfológicas que presenta, este contexto permite que muchos nuevos proyectos sean propuestos y desarrollados en el país.

En el municipio de San Andrés de Cuerquía del departamento de Antioquia, se ha observado un gran potencial hidroenergético, el cual se ve potenciado por su cercanía con Medellín, las vías de acceso, y su ubicación con respecto a otro gran proyecto como Hidroituango, estas condiciones han permitido que allí se concentren prospectivamente el desarrollo de proyectos de PCH, en este momento se encuentran en construcción dos proyectos PCH San Andrés y PCH La Chorrera, un proyecto licenciado listo para empezar construcción PCH Chorreritas y dos proyectos más que están pasando el proceso de Diagnóstico Ambiental de Alternativas, PCH La Gloria y PCH Cañaduzal.

Los proyectos a desarrollar en el municipio pertenecen a una misma cuenca lo cual permite inferir que los impactos producidos por las PCH's pueden llegar a acumularse y representar una afectación en toda la cuenca, de allí que es necesario el enfoque de impactos acumulativos, que debe verse como la interacción que tienen con la complejidad de las condiciones y relaciones de la zona en la que van a funcionar.

Se elige entonces como enfoque de la determinación de impactos acumulativos por la implementación de proyectos de producción hidroenergética, las dinámicas climáticas, ya que al hacer uso del recurso hídrico, el ciclo hidrológico en la etapa de operación puede verse muy afectado, este ciclo tiene gran incidencia en las condiciones climáticas que presenta la zona; para la identificación del impacto se toma como referencia el balance hídrico como determinante central, por su simplicidad, y porque el control del mismo depende de la disponibilidad de agua y la demanda atmosférica, representados por la precipitación y la

evapotranspiración, en este último existen parámetros que inciden en su comportamiento y que se representan como el termino residual de discrepancia, referido principalmente a impactos antrópicos y a la pérdida de evaporación por disminución en la lámina de agua en los tramos afectados por los proyectos.

La metodología se centra en la construcción del comportamiento de los tres elementos centrales del balance hídrico para este caso son la precipitación, la evapotranspiración y el termino residual de discrepancia, este último con diferencias para cada tramo de PCH proyectado a desarrollarse, de tal forma que este término va a ser el factor diferenciador que permitiría la construcción de diferentes escenarios, y así, observar el comportamiento del impacto definiendo sus afectaciones acumuladas para la zona de estudio.

2 Marco Teórico

2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como la transferencia de masas de agua en sus diferentes estados, líquido, gaseoso y sólido, todo esto bajo la influencia de la radiación solar, la gravedad y la dinámica de la atmósfera. El ciclo hidrológico posee diferentes fases, las cuales sirven para el estudio del estado y el comportamiento del agua en un sistema hídrico (IDEAM, y otros, 2010); gobernado por procesos naturales que suceden continua e irregularmente en el tiempo y espacio (IDEAM, y otros, 2010).

El patrón básico para comprender el proceder normal de los sistemas hídricos es el ciclo hidrológico y su balance de agua. La difícil relación entre la atmósfera y los procesos tanto superficiales como subsuperficiales afectan el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en cada uno de los sistemas hídricos. Es por ello, que los componentes del ciclo hidrológico se ven alterados según las características químicas, bioquímicas, variabilidad espacial y temporal, resiliencia, vulnerabilidad a la presión (incluidos usos de la tierra y cambio climático), susceptibilidad a la contaminación y capacidad de proveer servicios ambientales apropiados para ser utilizados en forma sostenible. (IDEAM, y otros, 2010).

Teniendo en cuenta la relación entre el ciclo hidrológico su balance y su interacción atmosférica, se debe acudir a los postulados de Budyko que “asumen que el balance hídrico es controlado por la disponibilidad de agua y demanda atmosférica, siendo la precipitación el agua disponible, y la evapotranspiración potencial la demanda atmosférica” (IDEAM, 2018), medidas que permiten comprender impactos de origen antrópico sobre parámetros climáticos, así como la oferta superficial multianual.

2.1.1 Precipitación

Fenómeno atmosférico producido por la caída de partículas de agua en fase líquida y sólida, a la superficie terrestre (Maderey R., y otros, 2005). Su formación inicia con la elevación de una masa de agua a la atmósfera, su enfriamiento, condensación y posterior precipitación (Chow, y otros, 1994). La precipitación dentro del ciclo hidrológico da origen a las corrientes superficiales y profundas (Rascón, 2005); afectada principalmente por tres factores: la

presión atmosférica, la temperatura y, esencialmente, la humedad atmosférica (IDEAM, y otros, 2010).

En Colombia la precipitación se distribuye según las variaciones espacio – temporales de la Zona de Confluencia Intertropical, por la influencia de los sistemas de circulación general de la atmósfera de la zona tropical y subtropical y por la interacción de estos factores con las características fisiográficas del país (IDEAM, y otros, 2010).

2.1.2 Evaporación

Se define como el proceso bajo el cual el agua se convierte en vapor de agua y se aísla de los cuerpos de agua, superficie evaporante. La evaporación y la transpiración constituyen las principales pérdidas hacia la atmósfera. La clave en el proceso de evaporación es la energía proporcionada por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire. A medida que la superficie se satura por efecto de la evaporación, la velocidad del viento contribuye al flujo de aire seco (mayor densidad) hacia la masa de aire saturado (menor densidad). Lo anterior, sumado al tipo de cobertura del suelo y la cantidad de agua en la superficie evaporante, son los parámetros a considerar para el cálculo (Pereira, y otros, 2006). La cuantificación se realiza en lámina de agua (mm) o unidades de energía por unidad de área (e.g., MJ m⁻²).

La evaporación depende fundamentalmente del déficit higrométrico: diferencia entre la presión de vapor saturado a la temperatura del agua, y la presión de vapor en el aire circundante, es decir, la evaporación depende tanto de la temperatura del agua como del aire (Maderey R., y otros, 2005).

2.1.3 Evapotranspiración

Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo (IDEAM, y otros, 2010).

Para referirse a la cantidad de agua que efectivamente es utilizada por la evapotranspiración se debe utilizar el concepto de evapotranspiración actual o efectiva, o el de evapotranspiración real (IDEAM, y otros, 2010); esta ocurre en la situación permanente del sistema y difiere de los límites máximos o potenciales establecidos; además de las

condiciones atmosféricas del entorno, influyen las reservas de humedad del suelo y las necesidades de la cobertura vegetal.

La ETR es uno de los componentes básicos de la ecuación del balance hídrico. Esta se obtiene aplicando fórmulas de diferentes autores donde se interrelacionan variables como la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP) (IDEAM, y otros, 2010).

2.1.4 Temperatura

La variación del calentamiento de la atmósfera es el resultado de la radiación entrante y saliente de la superficie terrestre y de la atmósfera. La temperatura del aire varía en el espacio y en el tiempo, dadas la radiación recibida, la naturaleza de la superficie, la distancia a los cuerpos de agua, el relieve y los vientos, entre otros (Chavez Córdoba, y otros, 1998).

2.1.5 Escorrentía

La escorrentía está compuesta por el flujo superficial Q_s o flujo hortoniano superficial, el flujo subsuperficial Q_{ss} y el flujo subterráneo Q_{subt} . Cuando el flujo superficial supera la resistencia de la interceptación en la superficie y la resistencia de la infiltración, alcanzará eventualmente la red de drenaje secundaria o fluirá directamente hacia el río (Min Ambiente, 2016).

2.1.6 Humedad relativa

Conocida como la fracción entre la cantidad de agua real en el aire y la cantidad que podría contener en un estado de saturación completo, varía entre un máximo al amanecer a un mínimo a primeras horas de la tarde; esta variación es debido a que la presión de saturación de vapor depende de la temperatura del aire (Min Ambiente, 2016).

2.2 Balance hídrico

Se define como balance hídrico superficial de oferta y demanda a la herramienta capaz de evaluar cuantitativamente, tanto espacial como temporalmente, los recursos hídricos en una unidad geográfica (UNESCO, 1982).

El balance hídrico superficial se basa en el principio de conservación de masa en un sistema cerrado, en donde cualquier variación en la cantidad de agua almacenada en la cuenca durante un periodo de tiempo, está definida como la diferencia entre el agua introducida al suelo y el agua extraída del mismo (Min Ambiente, 2016).

Un modelo de balance hídrico se define como la representación a través de ecuaciones, las cuales son desarrolladas para describir características del ciclo hidrológico, considerando diferentes grados de complejidad tanto del sistema como del modelador del área de estudio (Min Ambiente, 2016).

Son pocos los estudios de balance hídrico que contemplan de manera integral los impactos de la demanda de agua y la posible evolución futura de los componentes (Min Ambiente, 2016)

2.3 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – PCH

Son instalaciones que permiten el aprovechamiento de masas de agua en movimiento, transformándolas en energía eléctrica a través de turbinas acopladas a generadores, después de llevar a cabo este proceso, el agua es devuelta al río, conservando las condiciones iniciales, de modo tal que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo (USAENE, 2017). Los componentes principales de una central hidroeléctrica son:

- Captación: Se encarga de contener el agua de un río para llevarla a conducción.
- Sala de máquinas: Construcción donde se sitúan las máquinas (turbinas, alternadores, etc.) y elementos de regulación y control de la central.
- Alternador o generador: Máquina que transforma la energía mecánica en eléctrica.
- Conducciones: Estructuras hidráulicas que alimentan con agua las turbinas.

Las PCH son muy diversas en términos de tamaño, tipo de planta, tipo de unidad generadora, altura de la caída de agua ("cabeza"), así como de sus funciones (generación de electricidad, capacidad o multipropósito), estas características definen el sitio y las condiciones locales donde se implementan las mismas (Estrada Viana, y otros, 2012)

Las PCH se caracterizan por las tecnologías sencillas, de fácil adaptación e instalación, reduciendo con esto el costo de operación y mantenimiento, facilitando así la conexión para pequeñas poblaciones; para el Banco Mundial, Colombia es el cuarto país con más disponibilidad del recurso hídrico, con un caudal promedio de 66.440 m³/s (Sierra V, y otros, 2011), sin embargo, según el informe de gestión #2018, el *balance entre la oferta de energía firme y la proyección de demanda, se requiere energía adicional a partir de febrero de 2021* (UPME, 2018), convirtiéndose con esto en una idea de negocio bastante atractiva, por lo

tanto, Colombia, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, resolución 1519 de 2017, establece los

“términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica y se toman otras determinaciones”.

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), vienen cumpliendo un papel fundamental en el fortalecimiento de la generación de energía en las subregiones. El crecimiento en el número de PCH's en una misma región, ha hecho que los controles de dichos sistemas aumenten en complejidad (Estrada Viana, y otros, 2012).

2.4 Impactos acumulativos

Las actividades antrópicas que generan un impacto positivo o negativo sobre el medio ambiente, se definen como impacto ambiental, el cual puede manifestarse según la interrelación de acciones y/o efectos de manera: simple, cuando incide sobre un solo componente; sinérgico, cuando existe la presencia simultánea de varios agentes y generan una incidencia mayor que la individual sobre medio ambiente y, acumulativo, aquel que al prolongarse en el tiempo, aumenta progresivamente generando nuevas consecuencias (Vitora, 2006) (Vergara, 2012).

Según la Agencia Canadiense de Evaluación del Medio Ambiente (CEAA) se tiene que

“el impacto acumulativo puede resultar de acciones individuales y menores, pero colectivamente significantes que ocurren en un periodo de tiempo... [y además] (...) el impacto incremental de una acción ocurre cuando se añade a otras acciones pasadas, presentes o razonablemente previstas y sin que importe cual agencia o persona emprenda tal acción”.

“Los impactos acumulativos son contextuales y comprenden un amplio espectro de impactos a diferentes escalas espaciales y temporales, por lo cual constituyen en un reto para los tomadores de decisiones en el marco del licenciamiento ambiental. En algunos casos, los impactos acumulativos se producen porque se desarrollan una serie de proyectos del mismo tipo en la misma área; por ejemplo, cuando se construyen o

planifican varios proyectos hidroeléctricos en cascada sobre el mismo río o dentro de la misma cuenca...” (ANLA, 2018).

Se entiende como evaluación de impactos acumulativos a la valoración espacio – temporal de consecuencias acumuladas, producto de los proyectos desarrollados en una misma área (Vergara, 2012) (Seitz, y otros, 2010). Una de las principales dificultades presentes en los Estudios de Impacto Ambiental – (EIA) es la integración en el proceso de estimación de aquellos impactos que se dejan sentir por la acumulación de pequeños efectos causados por múltiples actividades. A pesar que la evaluación en un EIA de como resultado un impacto despreciable o leve, pero si a este se le agrega otro de la misma magnitud y así mismo se le agregan varios, se estaría considerando un impacto relevante que incluso impactaría en gran medida al medio ambiente, aportando al cambio climático, destrucción del hábitat, contaminación de suelo, aire y agua.

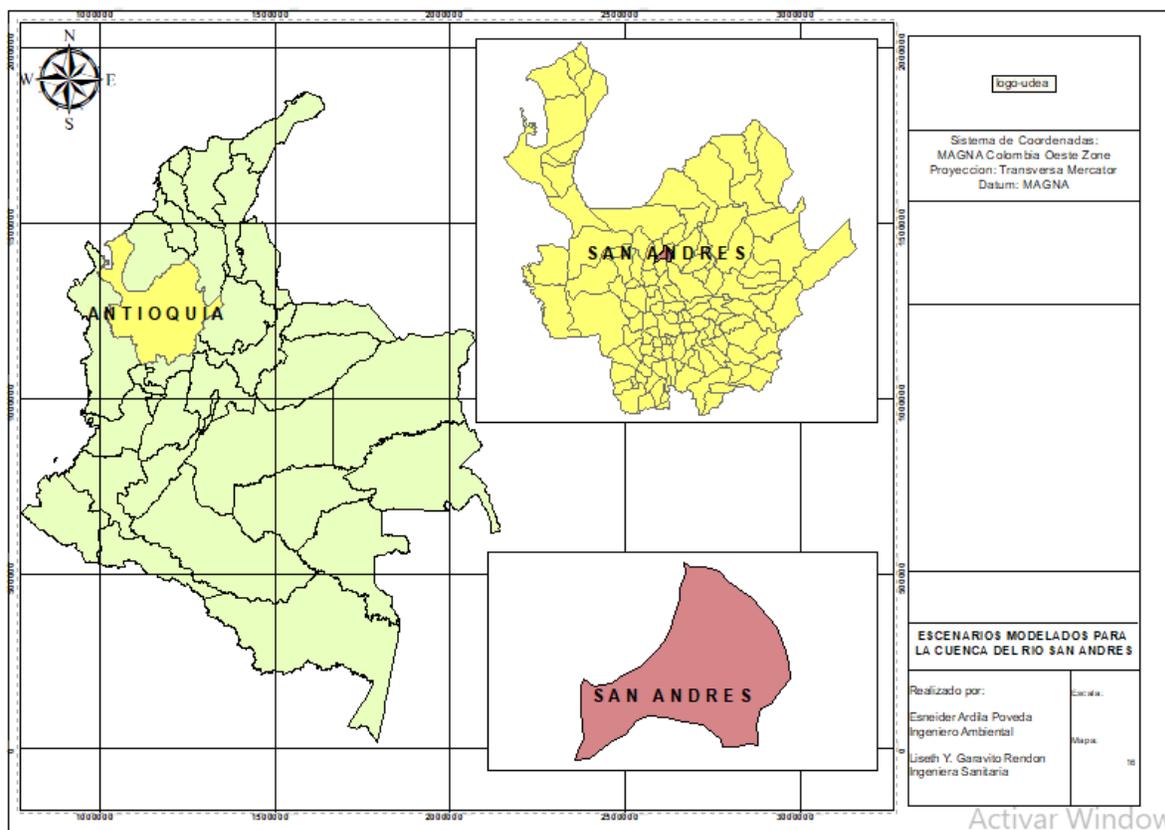
Se tiene que los impactos acumulativos pueden ser: **aditivos o incrementales**, el impacto acumulativo total es igual a la suma de los impactos de cada uno de los proyectos desarrollados en una misma área; de **ocurrencia supra – aditiva**, el impacto acumulativo total es mayor que la suma de los impactos individuales y, de **ocurrencia infra – aditivo** el impacto acumulativo total es menor que la suma de los impactos individuales (Vergara, 2012) (Masden, y otros, 2010).

3 Zona de Estudio

Como se muestra en la **Figura 1**, el municipio de San Andrés de Cuerquia, se encuentra localizado al norte del departamento de Antioquia, limitando por el norte con los municipios de Toledo, Briceño y Yarumal, por el este con Yarumal, por el sur con los municipios de Santa Rosa de Osos, San José de la Montaña y Liborina y por el oeste con el municipio de Sabanalarga.

Figura 1

Localización general municipio de San Andrés de Cuerquia.



La cuenca del río San Andrés cuenta con un área de 122.37km², con afluentes importantes tales como quebrada la chorrera, quebrada Santa Ana, quebrada La Honda; la zona cuenta con altas pendientes (escarpadas) las cuales permiten un perfil donde el agua viaja a mucha velocidad generando así un alto potencial hidrológico.

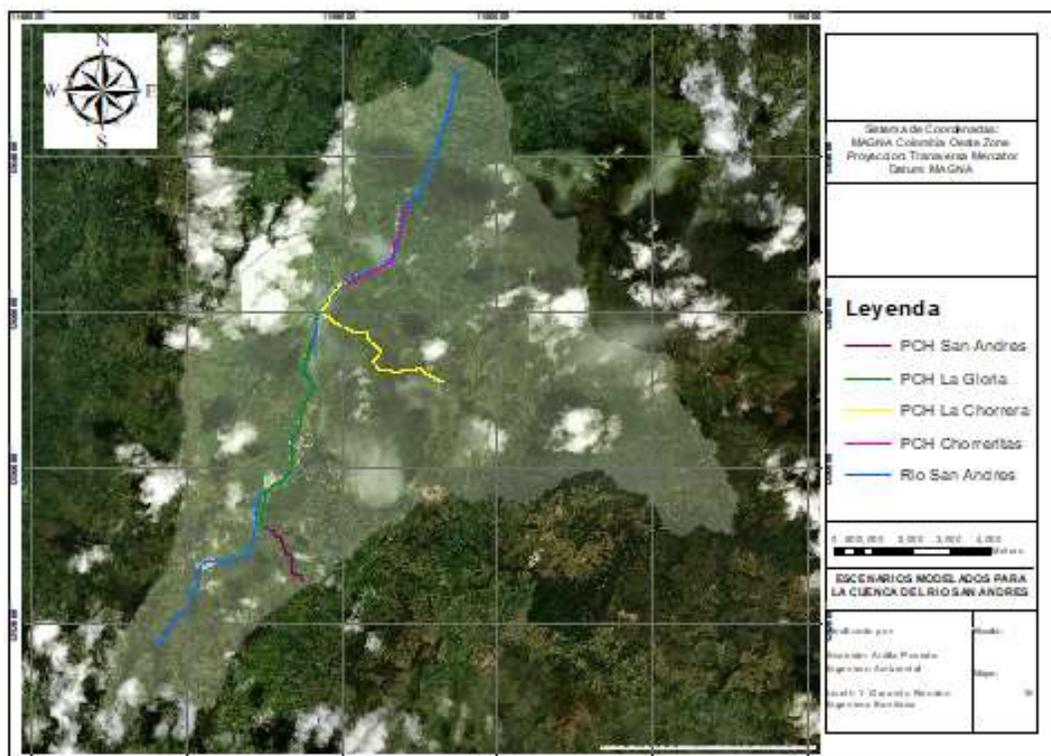
El municipio cuenta con una gran riqueza hidrográfica y numerosas caídas de agua, lo cual lo constituye con un potencial hidroenergético relevante, presentando en los últimos días, proyectos de desarrollo para su aprovechamiento, de esta manera a Corantioquia, la

corporación autónoma regional que tiene injerencia en esta zona, han llegado solicitudes donde se proyecta el funcionamiento de 7 PCH, 4 cuentan actualmente con licencia, de las cuales dos se encuentran actualmente en construcción, otra cuenta con concesión de agua,, por la antigüedad bajo la cual fue presentada, pero que aún no ha sido construida, y se encuentran otras dos en fase de Diagnóstico Ambiental de Alternativas.

En la **Figura 2**, se muestra la localización general de las diferentes PCH objeto de este estudio y que se programan construir en la cuenca del río San Andrés.

Figura 2

Localización general PCHs.



La elección definitiva de las fuentes de información se logrará después de la conceptualización del sistema en el entorno computacional seleccionado. La amplitud del área de influencia se define a través de un cuadrante externo al área de la cuenca, definido mediante la superposición del mapa de la cuenca, el DEM y la ubicación de las estaciones (Min Ambiente, 2016).

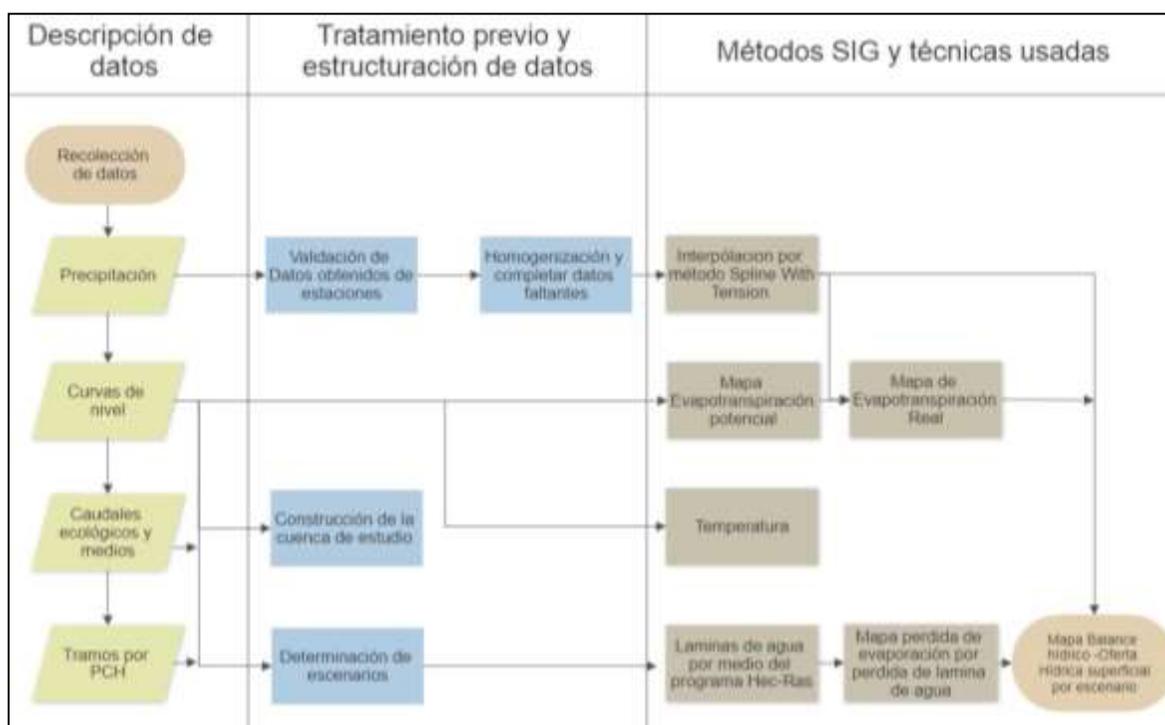
4 Metodología

Como se muestra en la Figura 3, La metodología utilizada parte de tres componentes, los cuales se describen brevemente a continuación.

- Descripción de los datos, se refiere a la recopilación de información base que permita la construcción del modelo; el
- Tratamiento previo y estructuración de datos, validación, estructuración y procesamiento de datos de la línea base, con el fin de lograr una homogenización de los mismos, que permita un mayor ajuste del modelo a construir y,
- Métodos SIG y técnicas usadas, en donde a través de los programas ArcGis y Hec-Ras se obtienen finalmente los parámetros que permiten la construcción del modelo y posteriormente la representación gráfica del mismo.

Figura 3

Diagrama de flujo metodología.



4.1 Descripción de datos

Para el desarrollo del presente trabajo se tuvieron en cuenta datos como precipitación, curvas de nivel, caudales de proyectos, tramos a ser intervenidos y los drenajes de la zona.

4.1.1. Recolección de datos

Los datos son de fuente secundaria, provienen de instituciones oficiales las cuales son IDEAM y CORANTIOQUIA, para la información específica de las características de las PCH, fue la entregada en el proceso de licenciamiento ambiental de cada uno de los proyectos, en sus diferentes fases a la corporación autónoma regional.

4.1.2. Precipitación

Los datos de precipitación, se obtuvieron de cuatro (4) estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, esto considerando la cercanía y cobertura del área de estudio, ver Tabla 1, en donde se muestran los códigos y la tipología de datos recolectados de cada una de las estaciones utilizadas.

Tabla 1
Estaciones meteorológicas.

Estación	Categoría	Código
Cruces Arriba	Pluviométrica	26230130
La Abertura	Pluviométrica	26230240
San Andrés	Pluviométrica	26230110
Matanzas	Climática	26235030

Se tomaron los datos teniendo en cuenta la calidad de los mismos y que fuera posible obtener de todas las estaciones el mismo rango de datos anuales, entre el año de 1994 y 2016.

4.1.3. Curvas de nivel

Los mapas de curvas de nivel de la cuenca, fueron tomados de las bases de datos entregadas en el proceso de licenciamiento ambiental por los proyectos PCH Chorreritas y PCH San Andrés, así como de la base de datos de la Corporación Autónoma del Norte de Antioquia – Corantioquia, cabe aclarar que estos datos son de dominio público y son usados con fines académicos.

Las curvas de nivel entregadas por los proyectos se encuentran en una escala 1:10000, lo cual permite que la altura entre curvas sea de 10 metros; las curvas de nivel del shape de la corporación son en una escala 1:25000, con una altura entre curvas de 50 metros. Las curvas entregadas por los proyectos cubren el 96% de la cuenca de estudio.

4.1.4. Caudales medios y ecológicos

Cada uno de los proyectos de PCH en su proceso de diseño y licenciamiento ambiental, realiza un proceso de cálculo de caudales, entre los cuales los más importantes son el caudal medio y el ecológico o ambiental, con diferentes metodologías y áreas, que dependen principalmente del punto en el cual toman el recurso hídrico para su aprovechamiento, para el estudio se toman estos caudales considerados como relevantes, para la determinación de los impactos acumulativos, teniendo en cuenta principalmente que la normatividad obliga a los proyectos a que en su funcionamiento se debe asegurar que la fuente siempre tenga por lo menos el caudal ecológico o ambiental.

4.1.5. Tramos por PCH

La determinación de la afectación por los impactos acumulativos está estrechamente relacionado con los tramos en los cuales se está realizando el aprovechamiento del recurso hídrico, ya que es en estos tramos donde se observa la disminución en la lámina de agua que afecta directamente la cantidad de agua evaporada en el balance hídrico de la cuenca.

Los tramos fueron consultados de la información entregada por los proyectos PCH's en sus procesos de licenciamiento a la autoridad ambiental, para estos casos Corantioquia, los cuales corresponden a los diseños que tienen cada uno de los proyectos dependiendo de la cantidad de energía que quieren producir, que se relaciona con la pendiente de la fuente hídrica y la cantidad de agua que transportan.

4.2 Tratamiento de datos y estructuración de datos

Todos los datos recolectados tuvieron que pasar por un proceso de análisis, donde se validó su pertinencia, su representatividad, calidad, confiabilidad, de esta manera definir si pueden llegar a tener un gran nivel de incertidumbre, una vez realizado este paso, se llevaron a cabo procesos para disminuir el grado de incertidumbre, y obtener un nivel de seguridad al hacer uso de los datos en los procesos de cálculo que se desarrollan en fases posteriores del estudio.

4.2.1. Validación de datos obtenidos de las estaciones

El proceso de validación para los datos de precipitación paso por la elección del rango de datos a tomar de las estaciones (entre 1994 y 2016), así mismo, se realizó el conteo y revisión de los datos faltantes en las estaciones, para poder completar los datos faltantes.

4.2.2. Homogenización y completar los datos faltantes

Para homogenizar los datos se elige la metodología del análisis de consistencia de datos, por medio de la construcción de la curva de dobles masas, la cual verifica la correlación entre las estaciones, se tomó la estación San Andrés como base, teniendo en cuenta que presenta todos los datos sin ningún faltante, que permite además corroborar un comportamiento estable de la precipitación que se presenta en la cuenca en las cuatro estaciones de la zona

La metodología para completar los datos faltantes de los años de las estaciones es la de los promedios, para esto es muy importante el proceso anterior de homogenización, ya que con la estación San Andrés se procede a calcular el dato más cercano a la realidad que falta en cada una de las estaciones para cada uno de los años de los cuales no se tiene información, el cual depende del comportamiento de la precipitación para el estación elegida como base.

4.2.3. Construcción de la cuenca de estudio

Para los datos de curva de nivel, se tuvo en cuenta como principal característica el área que cubren, ya que son un compendio de tres shapes, los cuales, unidos, cubren el área total preliminar elegida.

La construcción de la cuenca se llevó a cabo en diferentes pasos, el primero consistió en la revisión y corte de los shapes para evitar una superposición de datos, en el área preliminar elegida, lo que asegura la construcción del raster en el programa ArcGis, este paso debe disminuir la probabilidad de ambivalencias, dado el exceso de datos.

Adicionalmente, se decide tomar los drenajes de la base de datos de Corantioquia, puesto que estos cubren la totalidad del área total preliminar elegida, con esta información y las curvas de nivel previamente tratadas se procede a construir el raster, con el cual se realiza la delimitación de la cuenca de estudio.

Considerando que los datos disponibles y que la construcción de los proyectos hidroeléctricos se concentra sobre un área menor a la envergadura del área del río San Andrés, se toma la decisión de seleccionar un área menor, al área de la cuenca total que compone esta fuente hídrica, garantizando así una representación más asertiva de los fenómenos que definen el ciclo hidrológico.

4.2.4. Determinación de escenarios

El modelo se realizó a partir de la definición de escenarios, los cuales definen las condiciones bajo las cuales se debe desarrollar cada modelo, para la obtención de resultados a partir de condiciones que se pueden presentar en la zona de estudio, así, el escenario es la construcción de condiciones de modelación que dependen del contexto y principalmente de las condiciones del impacto objeto de estudio.

Para la definición de los escenarios modelados se tuvieron en cuenta tres etapas, las cuales se describen a continuación:

1. Determinación de los factores a incluir en el análisis e identificación de los factores claves, tales como, la disponibilidad de información, tramos afectados por PCH, caudales medios y ecológicos y, situación antes de la afectación.
2. Identificación del parámetro que globaliza la respuesta analizada, para este caso, la lámina de agua.
3. Identificación de las características que distinguen a cada escenario, es así, el nivel de impacto de cada uno de los tramos y su diferencia con las condiciones iniciales, sin implementación de ningún proyecto (PCH) (Min Ambiente, 2016).

Los escenarios se modelan teniendo como principal factor diferenciador, los tramos de cuerpo hídrico que afectan el ciclo hídrico y sus láminas de agua correspondientes para caudal ecológico y medio, ya que estos definen la variación en la evaporación a partir de las láminas de agua, las cuales son proyectadas por medio del programa Hec-Ras como se explica en el numeral anterior, a las que luego se le aplica el coeficiente de evaporación, que determinar el termino residual de discrepancia, de esta forma se inserta este factor en la fórmula de balance hídrico, junto con la precipitación y evapotranspiración.

4.3 Métodos SIG técnicas usadas

La identificación de impactos acumulativos se entiende desde la definición como un proceso complejo, ya que el ambiente tiene procesos sinérgicos que determinan flujos que pueden llegar a ser imperceptible, para el caso de los ciclos hidrológicos se observa el flujo de agua como uno de los principales determinantes de su comportamiento y disponibilidad, por tanto,

el enfoque debe realizarse teniendo en cuenta que el ciclo hidrológico es un proceso que se desarrolla a través del tiempo y del espacio, así, la herramienta que puede representar de la mejor forma este proceso son los Sistemas de Información Geográfica, a partir del uso de una serie de métodos que permitan una proyección teórica del comportamiento de parámetros de ciclo hidrológico, así como una lectura a través del balance hidrológico, estos métodos se describen en los próximos numerales.

4.3.1. Interpolación por método Spline With Tension

Se halla el valor mensual anual multianual de cada estación para el área de estudio. Para observar el comportamiento de la precipitación en el área de estudio, se evaluaron diferentes tipos de interpolación geostatística del programa ArcGis, IDW, Regular Spline, Spline with Tension, Quadratic e Inverse Multiquadratic, tomando como parámetro estadístico decisorio el Root Mean Squared, así, se elige el método con el menor valor, que para este caso fue Spline with tensión, el cual tiene un rango de error aceptable, representando de mejor manera los valores de precipitación en la zona de estudio para el tamaño de celda elegido.

4.3.2. Mapa de evapotranspiración potencial

Para la construcción del mapa del comportamiento de la evapotranspiración potencial se usa el raster de alturas, implementando la herramienta raster calculator y la ecuación de Cenicafe.

Teniendo en cuenta las escalas temporales y espaciales, Cenicafe construyó relaciones en diferentes regiones de la evapotranspiración de referencia con la altitud, de esta manera se pudo estimar una ecuación que permitiera conocer el valor medio para la evapotranspiración potencial, ver Ecuación 1 (Jaramillo Robledo, 2006).

Ecuación 1: Evapotranspiración potencial, Cenicafe.

$$ETP = 4,37exp^{-0.0002h}$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial (mm)

h: elevación (msnm)

4.3.3. Temperatura

Al no tener datos disponibles de temperatura aceptables para la zona de estudio, se procede a hacer el mapa del comportamiento de la temperatura a partir del cálculo por medio de la herramienta raster calculator, la ecuación de cenicafe y el DEM de elevación obtenido de los datos topográficos que se tienen de la zona de estudio.

El estudio de Cenicafe busca establecer regiones influenciadas por la zona de confluencia intertropical (ZCIT), teniendo en cuenta fenómenos macroclimáticos de las masas de aire, para cada una de las regiones encontradas, junto con un proceso de conglomeración, obteniendo para la región andina, ver Ecuación 2 (Chavez Córdoba, y otros, 1998).

Ecuación 2: Temperatura para región Andina, Cenicafe.

$$T = 29.42 - 0.0061 \times H$$

Donde:

T= temperatura media multianual (°C)

H= altura sobre el nivel del mar (msnm)

4.3.4. Mapa de evapotranspiración real

El comportamiento real proviene de la ecuación de Budyko (Calderón Castaño, 2017), la cual usa la interpolación seleccionada para la precipitación y el raster construido para la evapotranspiración potencial.

Con los raster de evapotranspiración potencial y de precipitación se vuelve a implementar la herramienta raster calculator aplicando la fórmula de Budyko para obtener el comportamiento de la evapotranspiración real.

La ecuación de Budyko de 1974 se encuentra definida como una de los métodos construidos empíricamente que permiten la estimación de la evapotranspiración real y se presenta a continuación (Calderón Castaño, 2017):

Ecuación 3: Budyko.

$$ETR = \left\{ ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right] \right\}^{1/2}$$

Donde:

ETR: evapotranspiración real

ETP: evapotranspiración potencial

P: precipitación media

*Se encuentran en mm

4.3.5. Láminas de agua por medio del programa Hec-Ras

Mediante la herramienta HEC RAS se realiza el proceso de construcción del comportamiento hidráulico de los tramos afectados de las PCH's y el río San Andrés para los caudales medios y ecológicos; teniendo en cuenta la información construida en ArcGis a partir de los DEM y el proceso de la herramienta GeoHec-Ras, el cual se usa para la determinación de información para la construcción de los cortes transversales de los tramos, estos determinan según el programa HecRas el área láminas de agua, que multiplicado por el coeficiente de evaporación teórico en el programa ArcGis, se define la disminución por evaporación en cada uno de los tramos estudiados y para cada PCH, según las láminas de agua, en mm.

4.3.6. Mapa pérdida de evaporación por pérdida de lámina de agua

Para el cálculo de la evaporación en cuerpos hídricos se toman como referencia los cálculos producto de métodos experimentales, los cuales tienen rango de error de alrededor de 15%, se estima que el coeficiente para un tanque evaporímetro Tipo A (superficie cilíndrica, con una profundidad de 25,4 cm y una superficie expuesta a la atmósfera de diámetro interno 121 cm) varía de 0,6 a 0,8, (UNESCO, 1982) *“este valor se multiplica mensualmente por el área de la superficie del cuerpo de agua y se obtiene el volumen de agua evaporada”* (Min Ambiente, 2016).

Con el raster obtenido del programa Hec Ras se construye un mapa donde el área afectada se le asigna un valor teniendo en cuenta el área de la celda y la evaporación perdida por cada celda, de tal forma que se obtiene un raster del área de estudio con la evaporación por la lámina de agua hallada para cada escenario proyectado.

4.3.7. Mapa balance hídrico – Oferta Hídrica Superficial por escenario

Teniendo en cuenta que “Los postulados de Budyko asumen que el balance hídrico es controlado por la disponibilidad de agua y demanda atmosférica, siendo la precipitación el agua disponible, y la evapotranspiración potencial la demanda atmosférica.” (IDEAM, 2018)

y que los datos de precipitación y evapotranspiración pueden ser implementados para calcular la oferta superficial multianual, se utilizan estos preceptos teóricos como base para hallar el posible impacto de la implementación de una PCH en la cuenca del área de estudio.

Al entrar en funcionamiento una PCH, se verá reflejado un impacto en la fuente hídrica, disminuyendo la lámina de agua, lo que a su vez reduce la oferta superficial, lo cual permitirá obtener una idea aproximada en los diferentes escenarios proyectados para la cuenca.

La disminución de lámina de agua se define como la diferencia entre las láminas de agua halladas entre el caudal medio y el caudal ecológico o ambiental.

La fórmula de balance hídrico se observa en la ecuación 4, donde la precipitación es el agua disponible y la evapotranspiración el potencial de la demanda atmosférica y la inclusión del factor diferencial, término residual de discrepancia, determinado en la ecuación de balance hídrico (IDEAM, y otros, 2010):

Ecuación 4: Balance hídrico, IDEAM

$$P - Esc (total) - ETR \pm \Delta s \pm \Delta ER = 0$$

Donde:

P: Precipitación (mm)

Esc: escorrentía total (mm) (flujo superficial + flujo subterráneo)

ETR: evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)

ΔS : Almacenamiento

Δer : Término residual de discrepancia

El término residual de discrepancia es aquel que permite visualizar de manera cuantitativa la afectación de origen antrópica por afectación en el recurso hídrico, siendo definido como el producto del cambio de la evaporación por disminución de la lámina de agua por sustracción de agua en el tramo afectado por las PCH.

Según los postulados de Budyko (IDEAM, y otros, 2010) la ecuación de balance hídrico se puede modificar y así determinar la oferta hídrica superficial, esto con el fin de que quede en términos de la precipitación, la evapotranspiración y el término residual de discrepancia, se aplica de la siguiente manera:

Ecuación 5: Oferta hídrica superficial.

$$P - ETR - \Delta ER = OHS$$

Donde:

P: Precipitación (mm)

ETR: evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)

ΔER : Término residual de discrepancia

OHS: Oferta Hídrica Superficial

Finalmente, como producto de este estudio, se obtienen los mapas a partir de la fórmula de balance hídrico para cada uno de los escenarios proyectados, donde el análisis de resultados se enfoca en términos de los efectos en factores climáticos, principalmente de la evaporación, y la pérdida de oferta hídrica superficial, por la disminución en la cantidad de agua evaporada en los tramos afectados por los proyectos PCH's.

5 Resultados

Considerando la espacialidad de los proyectos hidroeléctricos, se plantean los escenarios de impacto, según la Tabla 2, además, los caudales de funcionamiento de las PCH, al igual que los caudales mínimos que se deben considerar antes de poner en funcionamiento las mismas, este, como escenario más desfavorable, puesto que es el cauce de agua corriente mínimo que se debe garantizar para mantener las condiciones ecológicas de un cuerpo de agua.

Tabla 2

Escenarios de modelación.

Escenario	Descripción	Caudal (m ³ /s)
01	Río San Andrés	4.55
02	Río San Andrés	25.03
03	PCH San Andrés	0.71
04	PCH San Andrés	6.25
05	PCH La Gloria - Cañaduzal	1.68
06	PCH La Gloria - Cañaduzal	6.62
07	PCH La Chorrera	0.20
08	PCH La Chorrera	1.60
09	PCH Chorreritas	2.16
10	PCH Chorreritas	12.16
11	PCH San Andrés - PCH La Chorrera	0.71 0.20
12	PCH San Andrés - PCH La Chorrera	6.25 1.60
13	PCH San Andrés - PCH La Chorrera - PCH Chorreritas	0.71 0.20 2.16
14	PCH San Andrés - PCH La Chorrera - PCH Chorreritas	6.25 1.60 12.16

Escenario	Descripción	Caudal (m ³ /s)
15	PCH San Andrés - PCH	0.71
	La Chorrera - PCH	0.20
	Chorreritas- PCH La	2.16
	Gloria - Cañaduzal	1.68
16	PCH San Andrés - PCH	6.25
	La Chorrera - PCH	1.60
	Chorreritas - PCH La	12.16
	Gloria - Cañaduzal	6.62

Identificar escenarios de variación en los ecosistemas naturales puede proporcionar influencia positiva o negativa tanto en el clima local como en la diversidad biológica, dejando ver así los diferentes potenciales ecológicos, biológicos, sociales y culturales de un sistema (Pineda P, 2014), por tanto, es trascendente conocer dichos escenarios, ya que, de esta manera se pueden evitar alteraciones ecosistémicas que impacten significativamente el equilibrio ecológico. Entendiendo esto, el régimen hidrológico de los cuerpos de agua, en los últimos tiempos ha sido estudiado y controlado, esto con el fin de satisfacer las demandas asociadas entre otras a la generación hidroeléctrica, por lo que es indispensable pensar la relación existente entre las condiciones físicas y el régimen de caudal para la regulación regional de las actividades antrópicas en un mismo cuerpo de agua (Lytle, y otros, 2004).

Considerar un funcionamiento masivo de las PCHs estudiadas (escenarios 16 y 17) deja ver las afectaciones sobre la zona de estudio, puesto que el área acumulada afectada es de 65713,56 metros cuadrados, lo cual representa un 13,7 % del área de lámina de agua del río San Andrés para su caudal ecológico, impactando negativamente en la capacidad de evaporación del río San Andrés para la oferta superficial hídrica, dada la disminución en la evaporación dentro del balance hídrico proyectado, lo que afecta principalmente las características climatológicas de la zona de estudio, repercutiendo así en los parámetros incidentes en el ciclo hidrológico y en los procesos biológicos y físicos de la misma.

Por lo anterior, y considerando que la evaporación es el principal proceso por el cual el agua entra a la atmósfera y que, esta misma cantidad regresa a la tierra en forma de precipitación, se tiene que el anterior escenario modelado, trasciende principalmente en la alteración de los

milímetros de lluvias en el área de estudio, lo que posteriormente incide en los demás parámetros climatológicos de la misma.

Finalmente, puesto que cada escenario modelado, como se muestra en la Tabla 2, de manera independiente, según la cantidad de proyectos incluidos, incide notablemente en la lámina de agua perdida, la cual a su vez representa la cantidad evaporada, así como se muestra en la Tabla 3, en donde el escenario de mayor pérdida es, como se mencionó, el de mayor cantidad de proyectos en funcionamiento; por lo tanto, se menciona la importancia de la regulación de las intervenciones antrópicas sobre un mismo cuerpo de agua, puesto que el impacto generado por un solo proyecto, se acumula con los demás que se implementen sobre una misma cuenca, generando de esta manera incidencias mayores sobre cada uno de los servicios ecosistémicos ofrecidos por la misma.

Tabla 3
Área evaporada.

Escenario	Lámina de agua (m ²)
3 - 4	3.354,4
5 - 6	24.615,3
7 - 8	21.669,9
9 - 10	16.073,9
11 - 12	25.024,3
13 - 14	41.098,3
15 - 16	65.713,6

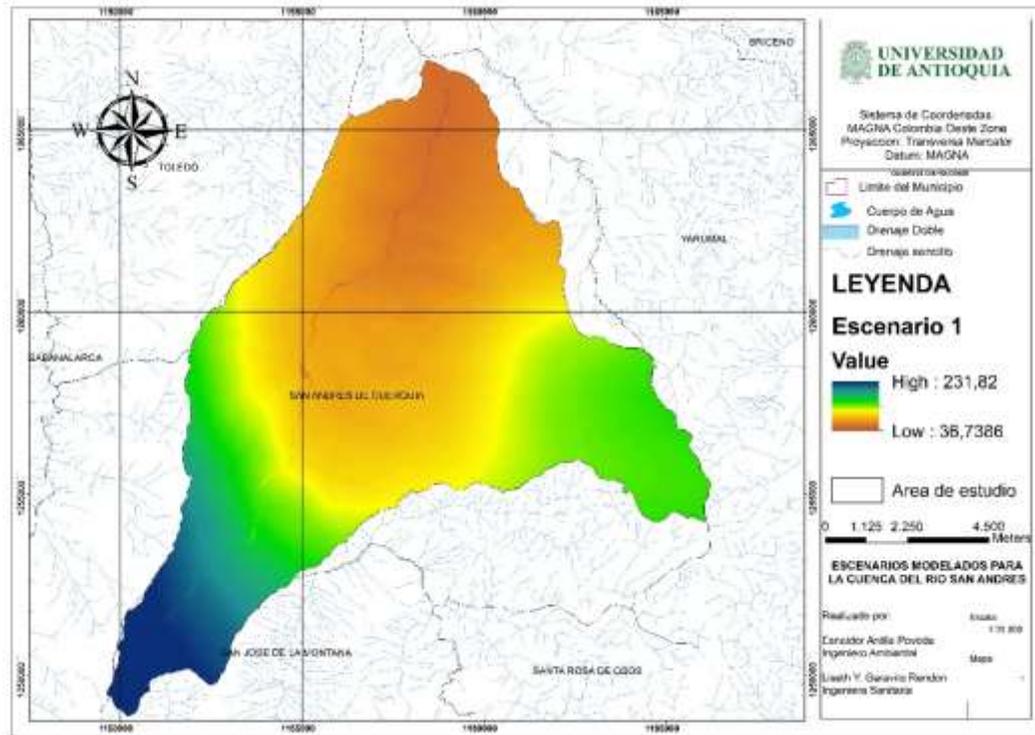
Los resultados que se muestran a continuación, son producto de la aplicación de la ecuación de balance hídrico para cada uno de los escenarios definidos en la herramienta ArcGis.

5.1 Resultados escenarios 1 y 2

Los escenarios 1 y 2 determinan las condiciones iniciales de la cuenca hídrica, muestran el contexto actual de la zona de estudio sin proyectos implementados, es decir, evidencian la oferta hídrica superficial actual de la cuenca en dos condiciones de caudales diferentes, caudal ecológico y medio en sus láminas de agua proyectadas; se mantienen las condiciones naturales del ambiente y de recuperación de sí mismo.

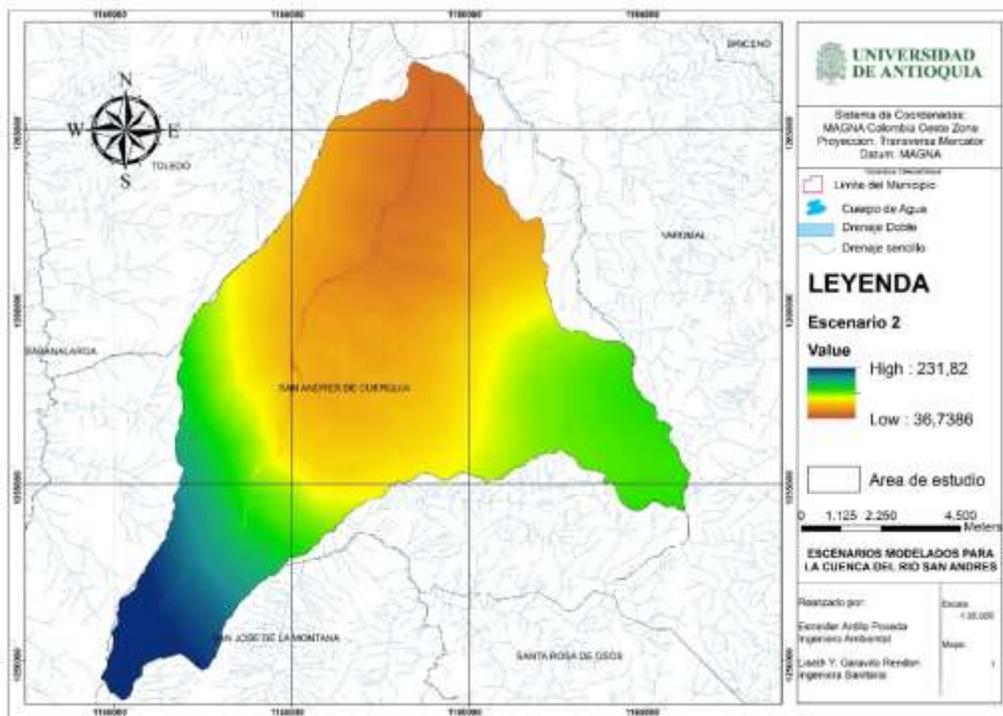
El caudal ecológico, Figura 4, es el que permite saber qué condiciones necesita el medio natural para desarrollar la complejidad de sus procesos, por tanto, es la base de un proceso de resiliencia a nivel físico y biológico principalmente.

Figura 4
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, Q=ecológico



El escenario de caudal medio, Figura 5, por otro lado, representa una situación más cercana al contexto actual de la fuente hídrica, ya que es un caudal que se presenta con mayor frecuencia, las condiciones deberían ser las ideales para que la mayoría de los procesos se desarrollen sin ningún estrés, sin grandes afectaciones, la lámina de agua es más grande y el proceso de evaporación transporta mayor cantidad de partículas de agua a la superficie.

Figura 5
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, $Q=$ medio



5.2 Resultados escenarios 3 y 4

Los escenarios 3 y 4 representan el tramo del río San Andrés, impactado por la PCH San Andrés que se encuentra actualmente en construcción, la oferta hídrica superficial, para los caudales ecológico y medio, se presenta a continuación en las Figura 6 y Figura 7, respectivamente.

Figura 6
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, $Q=ecológico$

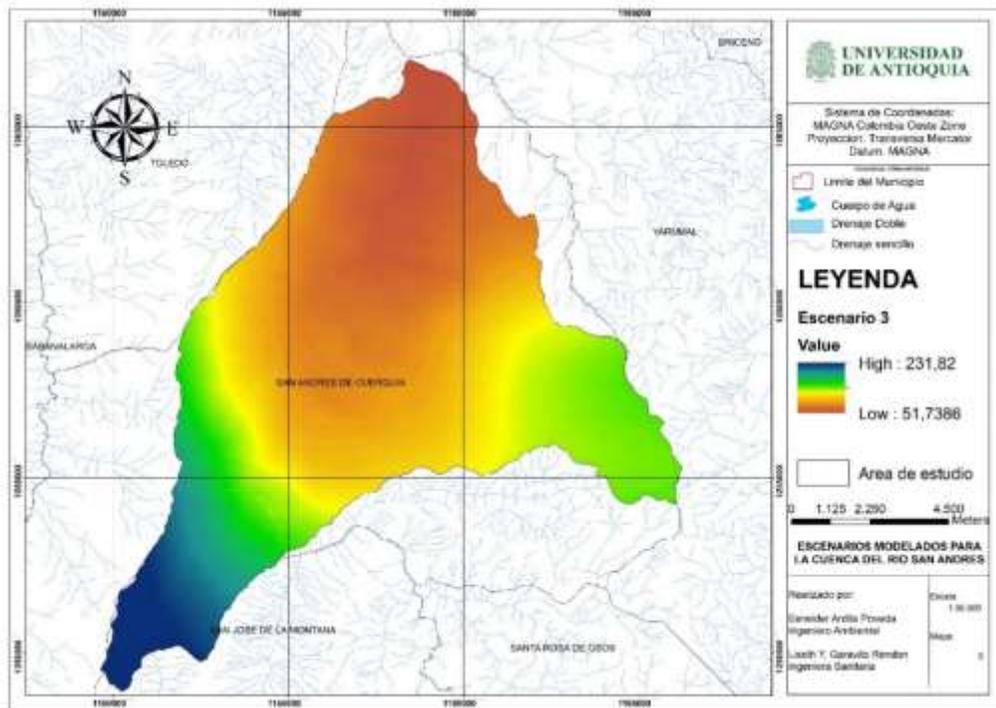
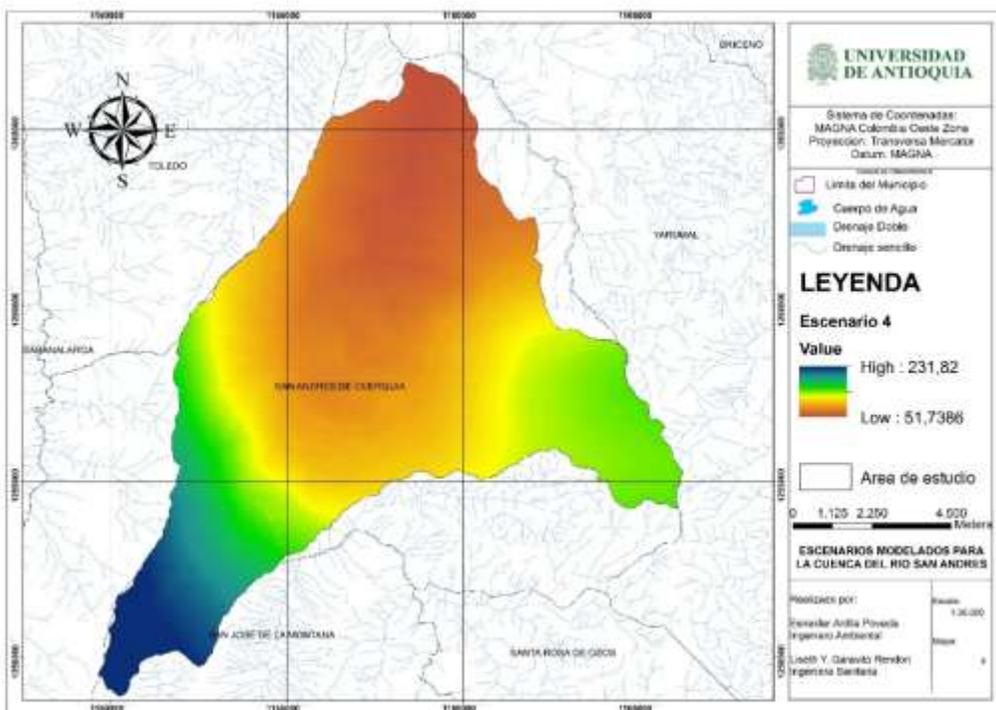


Figura 7
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, $Q=medio$.



5.3 Resultados escenarios 5 y 6

Los escenarios 5 y 6 representan el tramo intervenido por las PCH La Gloria y Cañaduzal, que se encuentran superando la fase de Diagnóstico Ambiental de alternativas, se decidió presentarlas en un mismo tramo porque las empresas proponen presentarlo en una misma licencia, y se presentan en cascada, las ofertas hídricas superficiales se presentan a continuación, en las Figura 8 y Figura 9, para caudal ecológico y medio respectivamente.

Figura 8

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH La Gloria y Cañaduzal, $Q=ecológico$.

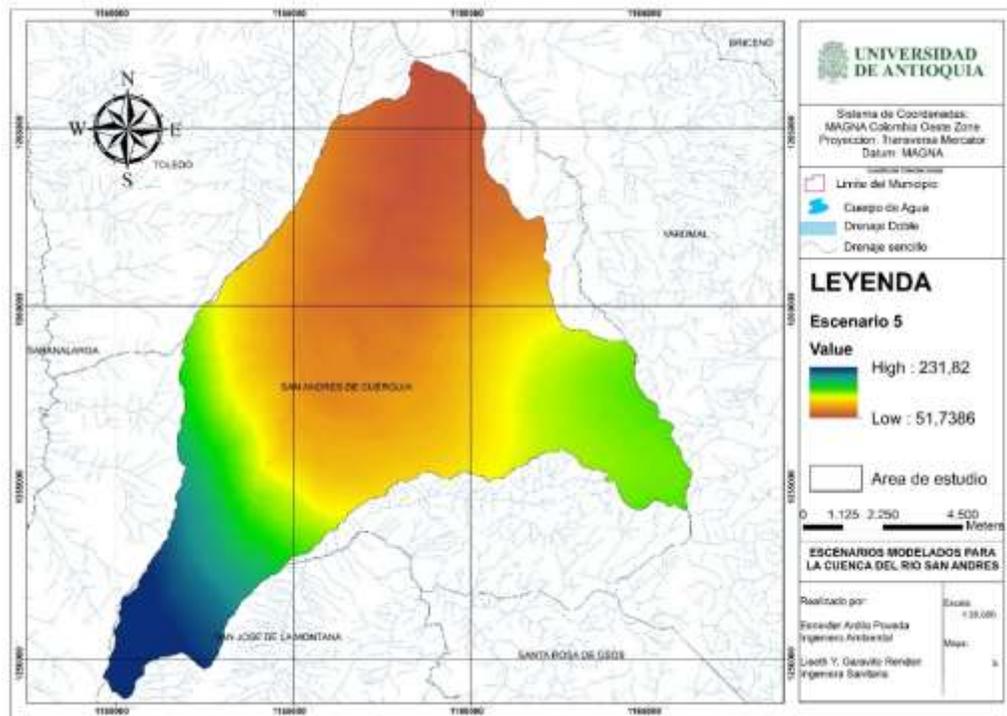
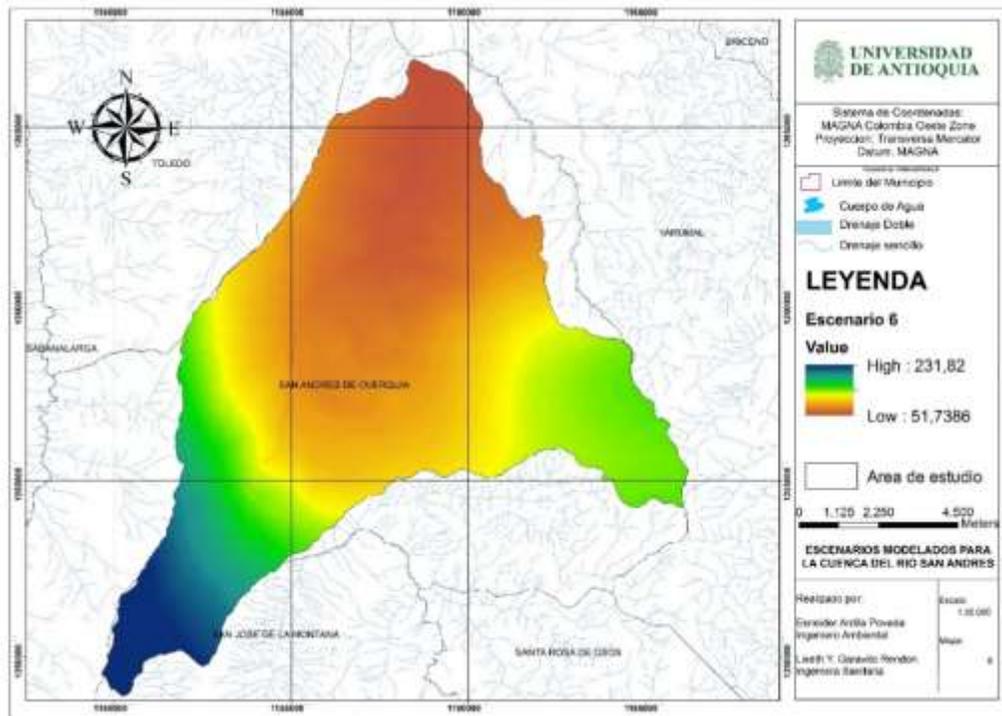


Figura 9
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH La Gloria y Cañaduzal, $Q=$ medio



5.4 Resultados escenarios 7 y 8

Los escenarios 7 y 8 representan el tramo afectado por la PCH La Chorrera, la cual se encuentra actualmente en construcción, la oferta hídrica superficial se muestra en las Figura 10 y Figura 11, que corresponden al caudal ecológico y medio respectivamente.

Figura 10

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH La Chorrera, $Q=ecológico$.

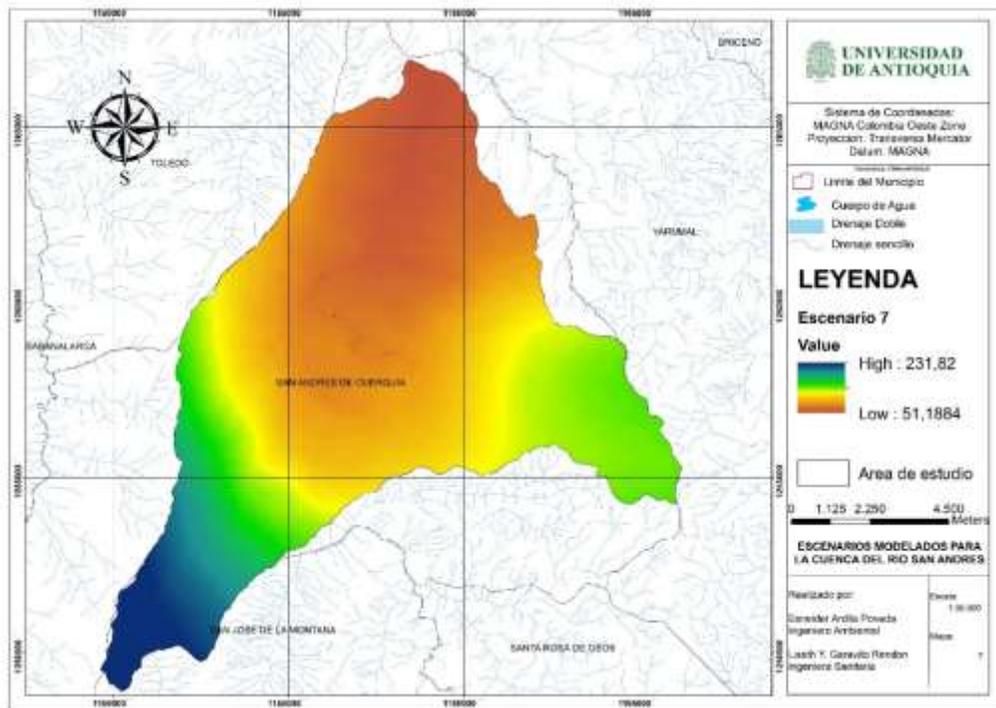
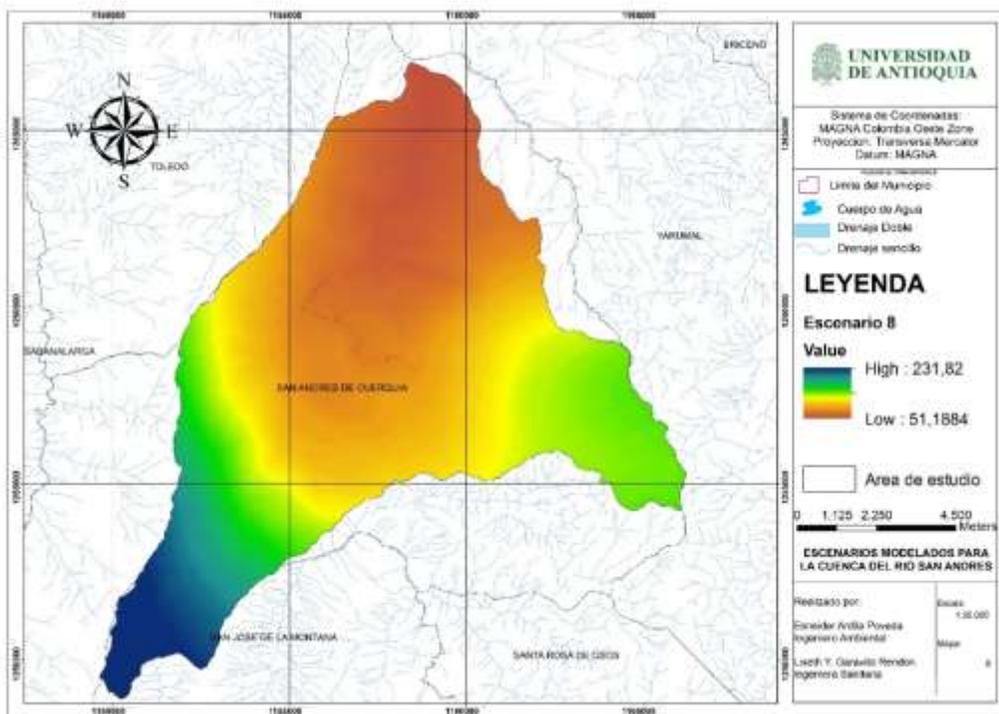


Figura 11

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH La Chorrera, $Q=medio$.



5.5 Resultados escenarios 9 y 10

Los escenarios 9 y 10 representan el tramo afectado por la PCH Chorreritas, que ya paso la fase de licenciamiento, la oferta hídrica superficial se presenta a continuación en las Figura 12 y Figura 13, que corresponden a el caudal ecológico y medio respectivamente.

Figura 12

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH Chorreritas, Q =ecológico.

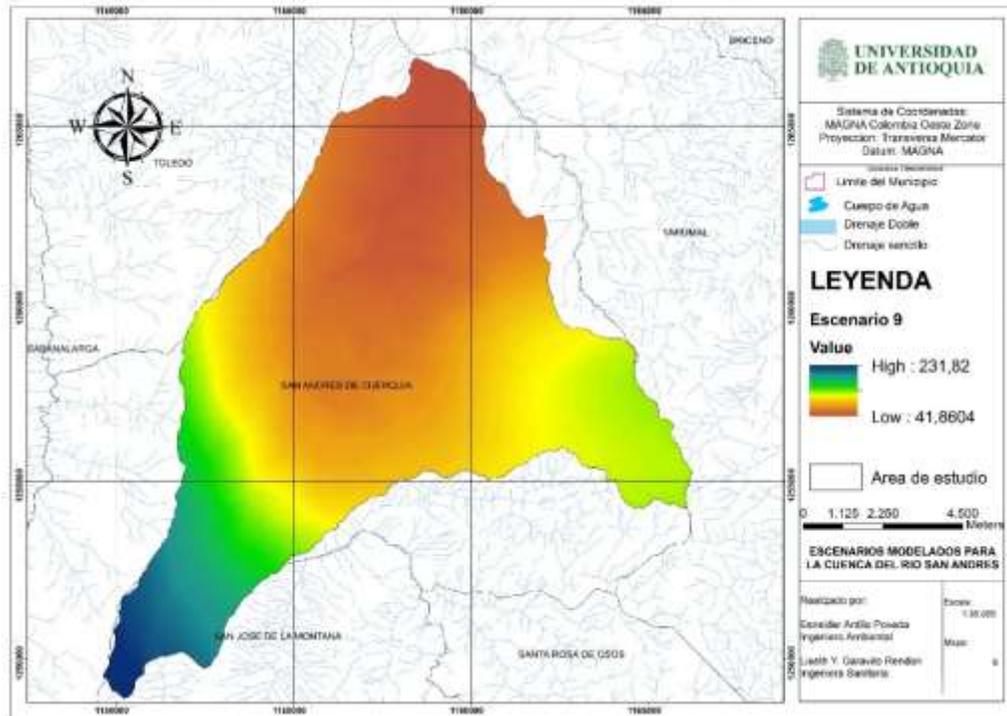
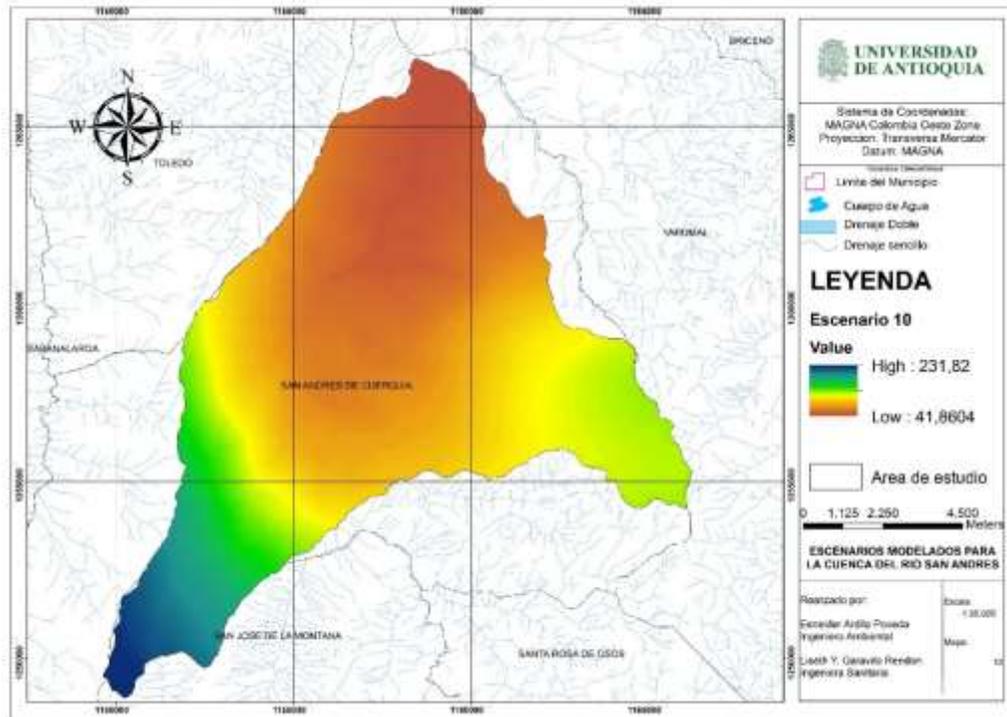


Figura 13
Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH Chorreritas, $Q=$ medio.



5.6 Resultados escenarios 11 y 12

Los escenarios 11 y 12 representan el tramo afectado por las PCH San Andrés y La Chorrera, las cuales se encuentran actualmente en construcción, siendo el escenario más próximo a presentarse, la oferta hídrica superficial se presenta a continuación en las Figura 14 y Figura 15, que corresponden a los caudales ecológico y medio respectivamente.

Figura 14

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés y PCH La Chorrera, $Q=ecológico$.

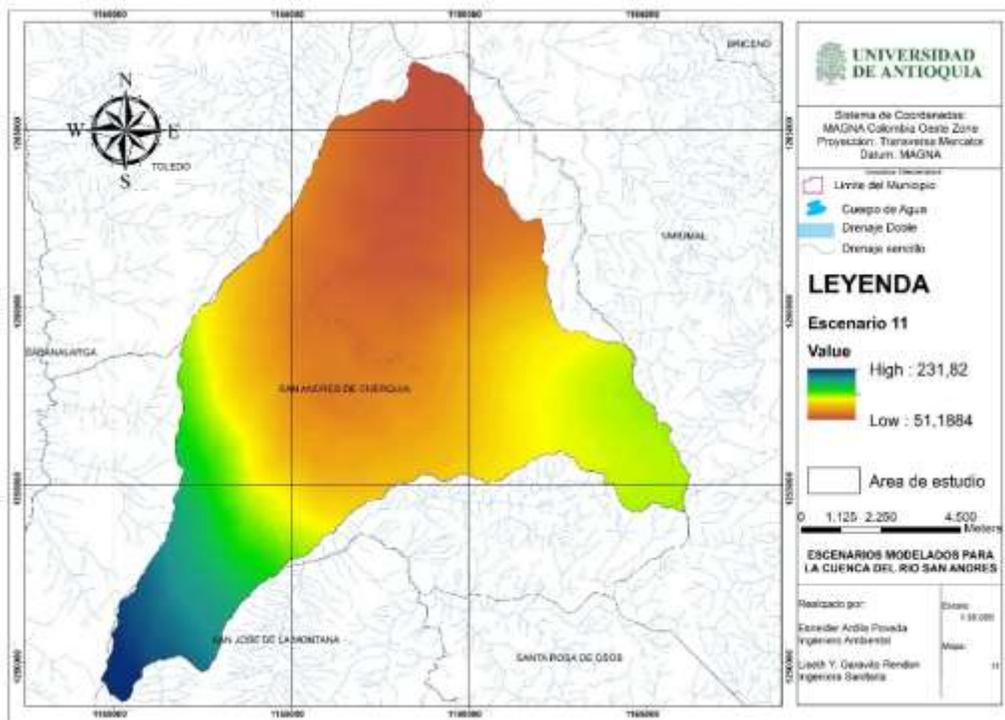
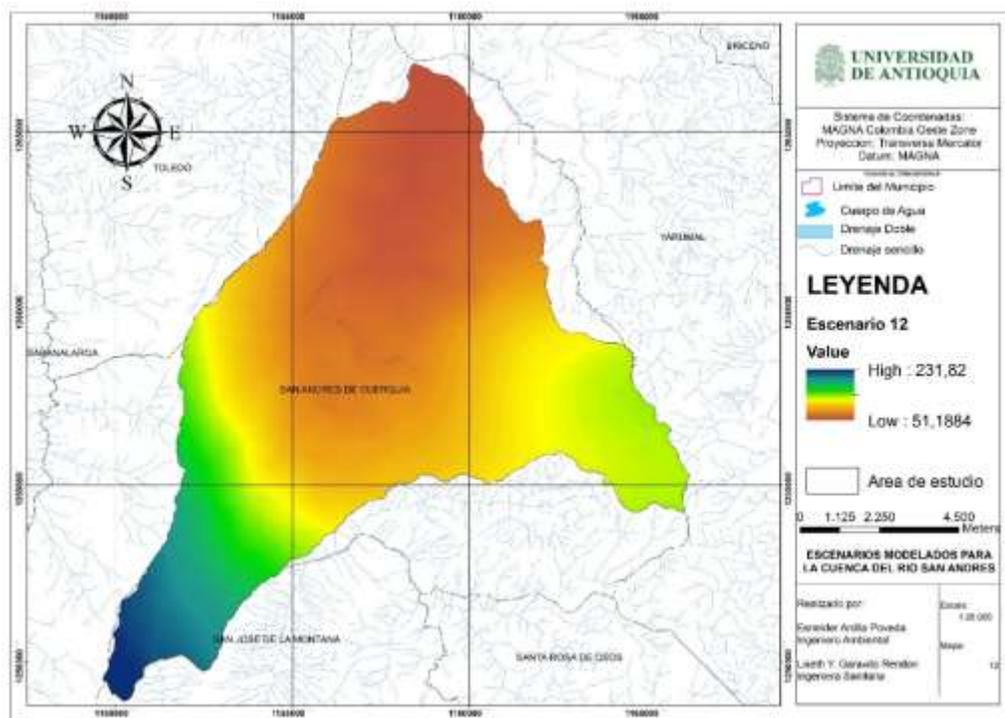


Figura 15

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés y PCH La Chorrera, $Q=medio$.



5.7 Resultados escenarios 13 y 14

Los escenarios 13 y 14 representan el tramo afectado por las PCH San Andrés, La Chorrera y Chorreritas, siendo este escenario con alta probabilidad de ocurrencia, ya que dos están en construcción y el último ya está licenciado, listo para entrar en fase de construcción, la oferta hídrica superficial se presenta a continuación en las Figura 16 y Figura 17, que corresponden al caudal ecológico y medio respectivamente.

Figura 16

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, PCH La Chorrera y PCH Chorreritas, Q =ecológico.

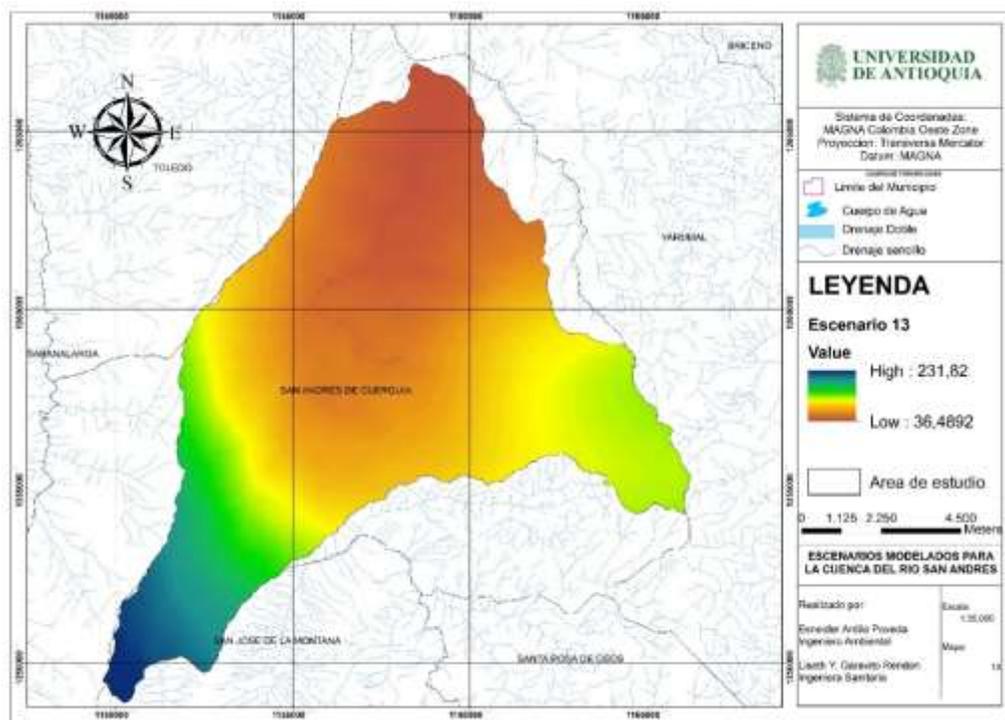
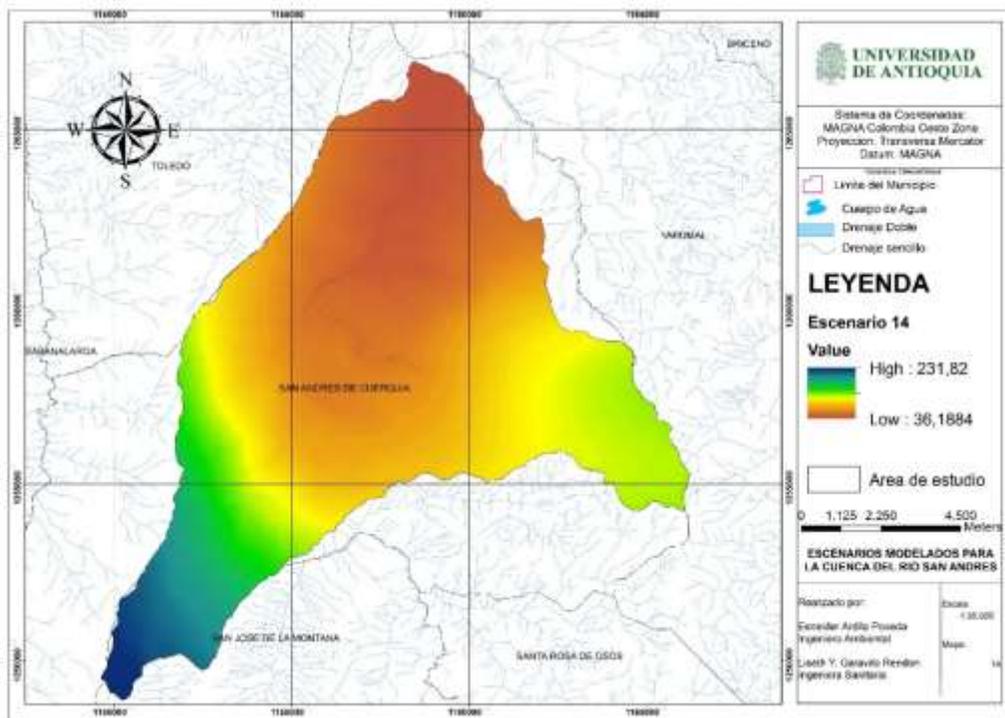


Figura 17

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, PCH La Chorrera y PCH Chorreritas, $Q=$ medio.



5.8 Resultados escenarios 15 y 16

Los escenarios 15 y 16 representan el tramo afectado por las PCH San Andrés, La Chorrera, Chorreritas, La Gloria y Cañaduzal, este escenario es el más crítico, ya que se daría con el funcionamiento de todos los proyectos en la zona de estudio, la oferta hídrica superficial se presenta a continuación en las Figura 18 y Figura 19, que corresponden a los caudales ecológico y medio respectivamente.

Figura 18

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, PCH La Chorrera, PCH Chorreritas y PCH La Gloria y Cañaduzal, $Q=ecológico$.

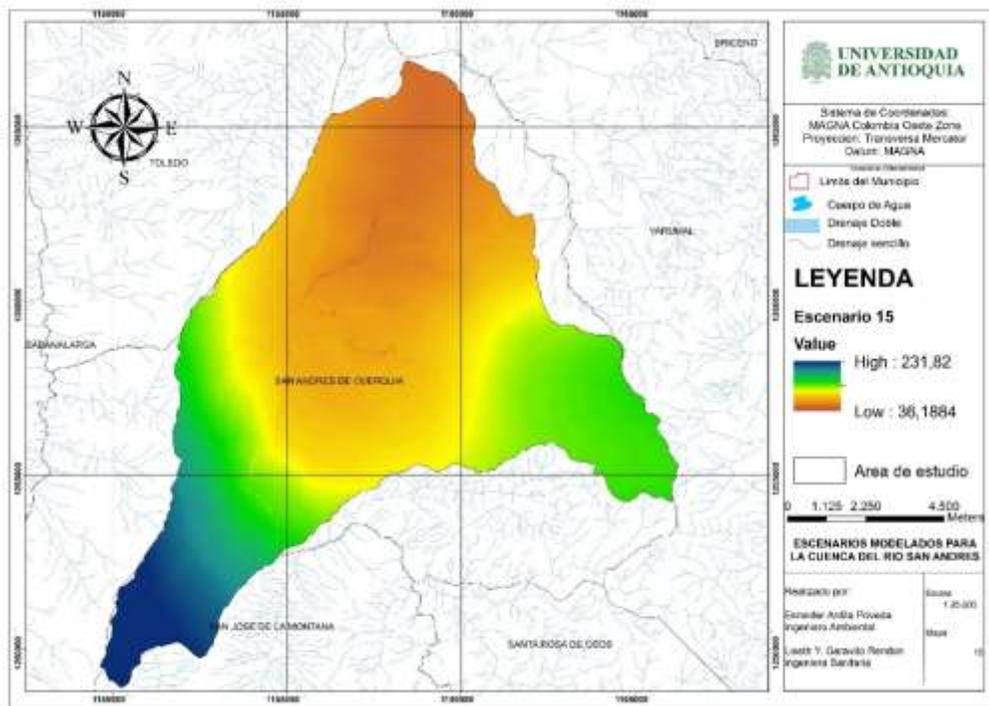
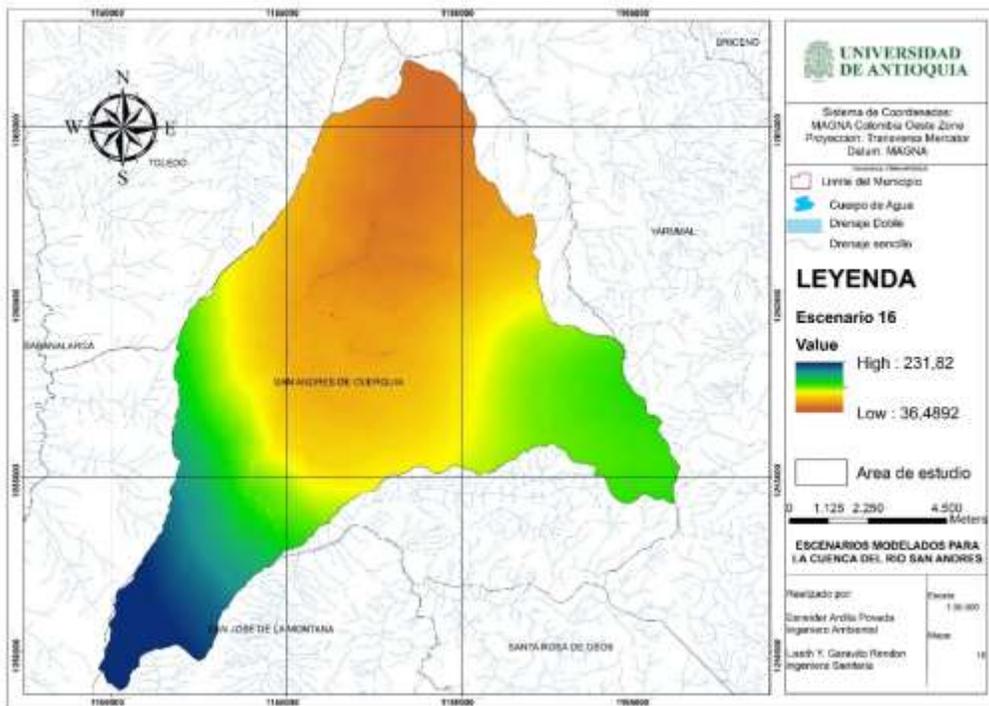


Figura 19

Oferta hídrica superficial del río San Andrés, PCH San Andrés, PCH La Chorrera, PCH Chorreritas y PCH La Gloria y Cañaduzal, $Q=medio$.



Los resultados de la modelación de escenarios se basan principalmente en los mapas presentados anteriormente para cada uno de los escenarios propuestos, teniendo en cuenta condiciones que permitieran hacer comparaciones entre los escenarios, para la determinación de los impactos.

6 Análisis de Resultados

Las áreas afectadas encontradas son el resultado de la resta del área de lámina de agua para el caudal ecológico según el escenario estimado, del área de la lámina de agua para el caudal medio que contiene las mismas condiciones de evaluación, de tal manera que se define la disminución en la lámina de agua, esto teniendo en cuenta que la PCH tiene el compromiso de respetar el caudal ecológico asegurando mínimamente siempre este flujo de agua.

Para el análisis se agruparon los escenarios según las condiciones que representan y el área afectada:

6.1 Análisis de resultados escenario 1 y 2

Se tiene en cuenta el concepto de caudal ecológico, y lámina de agua, así como su importancia en el proceso de evaporación, ya que estas condiciones limitan la adición de partículas de agua al ciclo hidrológico en la superficie; así, la oferta hídrica superficial resultante, define un nivel de procesos con otros factores, principalmente climáticos, que dependen del mantenimiento de dicha lámina de agua.

Los escenarios 1 y 2, son escenarios base los cuales se presentan en la zona de estudio, permite determinar cuál es el comportamiento de la evaporación con láminas de agua que no tienen los impactos causados por los proyectos, los niveles de evaporación en ambos escenarios son importantes y corresponden a comportamientos en condiciones ecológicas y medias, en la que se presenta un mayor nivel de evaporación para el caudal medio, que aporta en gran medida a la oferta hídrica superficial y al ciclo hidrológico.

6.2 Análisis de resultados escenarios 3 y 4

La PCH San Andrés se encuentra actualmente en construcción y se ubica en la parte alta de la zona de estudio, de tal forma que la cantidad de agua tomada es mucho menor, ya que se busca aprovechar la columna de agua producida por la pendiente que se presenta en el tramo elegido a afectar, teniendo en cuenta estas condiciones la lámina de agua afectada es menor, esto es soportado por los resultados del proceso realizado en Hec-Ras.

Los resultados presentan una diferencia en el área de lámina de agua entre el caudal medio y el caudal ecológico de 3354,41 metros cuadrados de lámina de agua, para el tramo

influenciado por la PCH San Andrés, esta es la afectación sobre la oferta hídrica superficial que generaría la disminución del caudal en este tramo para los caudales entregados por la empresa, siendo este el valor más bajo frente a los demás tramos afectados por los proyectos, el tramo es el más corto, así, tanto en espacio como en tiempo el uso del recurso es menor, por otro lado el tramo se ubica en una zona con una alta oferta hídrica superficial.

6.3 Análisis de resultados 5 y 6

El escenario se presenta para los proyectos PCH La Gloria y PCH Cañaduzal los cuales funcionarían en cascada y a pesar que van a ser desarrollados por diferentes empresas, se presentan en un solo proceso de licenciamiento. Adicionalmente, como se encuentra superando su etapa de Diagnóstico Ambiental de Alternativas, los caudales pueden sufrir pequeñas variaciones para los diseños definitivos de las estructuras, ya que esto depende principalmente del tramo seleccionado por la autoridad ambiental.

El área afectada por la posible implementación de estos dos proyectos, PCH La Gloria y Cañaduzal es de 24615,3 metros cuadrados, el tramo de la fuente a ser afectada es mucho mayor; de la misma manera los caudales aumentan para este caso, lo cual se refleja en una mayor área afectada con respecto a la anterior, es uno de los tramos más largos, así, revisten un mayor impacto sobre la lámina de agua, y sobre la evaporación en la oferta hídrica superficial, el caudal tomado es mayor para suplir la pendiente del tramo en el cual se aprovecha el recurso.

6.4 Análisis de resultados escenarios 7 y 8

La PCH La Chorrera está próximo a terminar su fase constructiva y entrar en fase de operación, presenta un tramo representativo respecto a los demás proyectos que afectarían la zona de estudio, el área afectada es representativa con respecto a los demás proyectos y se ubica en la parte media del área de estudio.

El tramo afectado de este proyecto se presenta directamente sobre la quebrada La Chorrera y el Rio San Andrés, el área afectada es de 21669,88 metros cuadrados de lámina de agua, su afectación con respecto a los demás tramos la ubican de segunda, la oferta hídrica varía con respecto al desarrollo del tramo, de tal forma que las condiciones climáticas no son uniformes en el tramo, se aprovecha para la columna de agua principalmente la pendiente del tramo.

6.5 Análisis de resultados escenarios 9 y 10

Este proyecto se encuentra licenciado, aún no se ha iniciado su fase constructiva, al área afectada del río San Andrés es de 16073,96 metros cuadrados, se encuentra ubicada cerca del final de la zona de estudio, los caudales presentados son representativos y a su vez son los que mejor representan el área de estudio ya que su cálculo toma todas las áreas anteriores y los ingresos de los diferentes caudales de las fuentes aferentes al río.

El área afectada es relevante en el tercer puesto respecto a los otros tramos afectados, las condiciones del río en este punto son diferentes debido a que en este punto sus pendientes no son tan pronunciadas y el agua tiene un canal más amplio por el cual fluye, lo cual define que su impacto es mucho menor al esperado.

La ubicación del tramo también tiene condiciones diferentes con respecto a la evapotranspiración ya que allí las temperaturas son más altas, evaporación potencial es mayor y la cantidad de agua por precipitación menor, razón por la cual los niveles de evaporación son menos evidentes.

6.6 Análisis de resultados escenarios 11 y 12

Para este escenario se tomaron los tramos de dos PCH, San Andrés y La Chorrera, bajo la premisa que ambos proyectos se encuentran en proceso de construcción, y están próximas a entrar en etapa de operación, por tanto, son las más próximas a generar un impacto sobre la zona de estudio.

El área afectada es de 25024,29 metros cuadrados, correspondiente a la que se encuentra en cada tramo y que corresponde al 5 % de la lámina de agua del río San Andrés con caudal ecológico, esto supone una disminución importante teniendo en cuenta que los tramos afectados son menores al tramo del río.

Este escenario los tramos se encuentran entre la parte alta y media de la zona de estudio, por tanto la oferta hídrica superficial es media - alta, los caudales aprovechados son bajos, a pesar de esto el área afectada es mayor para la PCH La Chorrera, por tanto es la que tiene mayor impacto.

6.7 Análisis de resultados escenarios 13 y 14

Estos escenarios consideran que estos tres proyectos se encuentran licenciados, y dos de ellos en construcción, lo que determina que son afectaciones que van a ocurrir en la zona de estudio, además, son proyectos que cuentan con su respectivo estudio de impacto ambiental y solo la PCH Chorreritas contempla impactos acumulativos respecto a sus áreas de influencia.

El área afectada es de 41098,26 metros cuadrados lo que representa el 8,5 % del área de la lámina de agua del caudal ecológico, este contexto permite observar la acumulación de los impactos y sus efectos sobre la oferta hídrica superficial, la cual tiene diferentes condiciones para cada tramo, ya que en las PCH San Andrés y PCH La Chorrera, por la pendiente y la longitud del tramo se presentan diferentes cantidades de oferta, en cambio en la PCH Chorreritas como su aprovechamiento es en pendientes menores la zona presenta condiciones climáticas más estables y por tanto la oferta es diferente con respecto a las otras dos.

6.8 Análisis de resultados escenarios 15 y 16

Estos últimos escenarios ejemplifican el mayor impacto proyectado sobre el área de estudio, teniendo en cuenta que se supone las 5 PCH's en funcionamiento, aprovechando el recurso hídrico en sus respectivos tramos para la producción de energía.

El área afectada acumulada de los tramos afectados es de 65713,56 metros cuadrados, lo cual representa un 13,7 % del área de lámina de agua del río San Andrés para su caudal ecológico, esto se traduce en un porcentaje importante de la capacidad de evaporación del río San Andrés en la oferta superficial hídrica de la cuenca, afectando principalmente parámetros climatológicos, que determinan parte del ciclo hidrológico y de las condiciones de desarrollo de procesos biológicos y físicos del municipio.

La afectación de los tramos en la oferta hídrica superficial permite observar la complejidad que presenta, ya que las condiciones de cada tramo son diferentes pero se interrelacionan sobre una misma fuente hídrica, de esta manera se constituye en una acumulación en la disminución del factor de evaporación en el balance hídrico proyectado, que permitiría vislumbrar afectaciones en las relaciones climáticas que se tiene con respecto a la oferta hídrica superficial.

7 Conclusiones

- El balance hídrico es la herramienta técnica que permite obtener resultados ajustados en el proceso de conocer posibles impactos sobre el clima, ya que el ciclo hidrológico está estrechamente ligado a las condiciones que definen los parámetros climáticos, es así como, cualquier variación en los flujos de agua que se presentan en una cuenca, permiten determinar variaciones en el clima, o impactos sobre el mismo.
- La oferta hídrica superficial permite determinar a partir de la precipitación y la evapotranspiración, otra interpretación del balance hídrico, así, como posibles impactos de origen antrópico si se hace uso del término residual de discrepancia, el cual debe ser calculado teniendo en cuenta las condiciones presentadas en la zona de estudio.
- Se observa una dinámica climática e hidrológica en la zona de estudio, lo cual permite determinar que el área de influencia de los impactos producidos tras la implementación de las PCH en los tramos del río San Andrés, debe ser tomada acumulativamente y así poder determinar el grado de afectación de las actividades de los proyectos.
- Los mapas resultantes representan las condiciones de oferta hídrica superficial, para caudales medios y ecológicos en los tramos de afectación de cada proyecto, teniendo en cuenta que el caudal ecológico es la referencia para los procesos físicos, biológicos y sociales, mismos que son afectados, positiva o negativamente, por el clima, generando condiciones básicas para el desarrollo o no de dichos procesos.
- Los impactos acumulativos son un proceso complejo en el cuales se debe establecer de la manera más precisa posible el área de influencia de proyectos, teniendo en cuenta condiciones ambientales, grados de afectación, transporte de impactos y el principal medio afectado, para este caso de estudio el recurso hídrico es el que recibe el impacto, pero sus afectaciones se pueden observar en diversas dimensiones, tales como el clima, que depende vitalmente de su ciclo y el balance de la cuenca.
- Las áreas afectadas en cada uno de los escenarios permiten observar tanto impactos individuales como colectivos, lo cual facilita la lectura de cada proyecto y de los acumulados a partir de diferentes situaciones que se proyectan pueden suceder, de tal

forma que puede ser una herramienta para la toma de decisiones, en el manejo de impactos ambientales.

- La afectación es más visible para el escenario donde se asume el funcionamiento de todos los proyectos (PCHs), puesto que la diferencia entre el área modelada es considerable frente al área por caudal ecológico de la fuente principal objeto de estudio, lo cual permite observar una afectación sobre la zona de estudio y en sus condiciones climáticas.
- El clima es una condición compleja en cualquier zona de estudio, principalmente porque existen diferentes elementos que la constituyen, con interacciones que pueden ser confusas, en las que se involucran muchos factores tanto físicos como biológicos, en algunos casos se pueden asumir elementos que la pueden controlar y hacer una lectura sobre ellos, pero un impacto acumulado sobre un recurso que tiene conexión directa con factores climáticos, puede llevar a condiciones de cambio en la interacción de los elementos que componen el clima y las diferentes consecuencias generadas producto de ello.
- La metodología utilizada en el desarrollo del presente trabajo, como solución a la problemática que se presenta en el municipio de San Andrés de Cuerquia, puede servir como insumo para las corporaciones autónomas regionales como CORANTIOQUIA, para ayudar a determinar los impactos acumulativos que se puedan presentar producto de la implementación de varias PCHs, sobre un área determinada.

8 Referencias

ANLA Instructivo metodológico de impactos acumulativos [Informe]. - Bogotá : Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2018.

Calderón Castaño Luisa Fernanda Estimación y análisis de la evapotranspiración en el municipio Manizales [Informe]. - Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2017.

Chavez Córdoba Bernardo y Jaramillo Robledo Alvaro Regionalización de la temperatura del aire en Colombia [Publicación periódica] // CENICAFE. - 1998. - págs. 224-230.

Chow Ven Te, Maidment David y Mays Larry Hidrología aplicada [Libro]. - [s.l.] : McGraw Hill, 1994.

Estrada Viana Iván Dario, Peña Palacio Juan Alejandro y Guamiso Lemus Cristian Estimación de modelos lineales para el control predictivo de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas [Publicación periódica] // Soluciones de posgrado EIA. - 2012. - págs. 63-78.

IDEAM Estudio Nacional del Agua 2018 [Informe]. - Bogotá : [s.n.], 2018.

IDEAM Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia - GPVD [Informe]. - Bogotá : [s.n.], 2001.

IDEAM y Min Ambiente Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua ERA [Informe]. - Bogotá : [s.n.], 2010.

Jaramillo Robledo Alvaro Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia [Publicación periódica] // CENICAFE. - 2006. - págs. 288-298.

Lytle David A y Poff N LeRoy Adaptation to natural flow regimes [Publicación periódica]. - [s.l.] : Trends in Ecology & Evolution, 2004. - Vol. 19.

Maderey R. Laura H. y Jiménez R Arturo Principios de hidrogeografía Estudio del ciclo hidrológico [Libro]. - México : Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.

Masden Elizabeth A [y otros] Cumulative impact assessments and bird/wind farm interactions: Developing a conceptual framework [Publicación periódica] // Science Direct. - 2010. - 1 : Vol. 30. - págs. 1-7.

Min Ambiente Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales [Libro]. - La Paz, Bolivia : Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2016.

Pereira Luis S [y otros] Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua [Libro]. - Roma : FAO, 2006.

Pineda P María M Los servicios ecosistémicos en las cuencas hidrográficas y su relación con los proyectos de generación de energía eléctrica a través de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas [Informe]. - Medellín : Universidad de Antioquia, 2014.

Rascón Laura Elena Maderey Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico [Libro]. - Ciudad de México : [s.n.], 2005.

Seitz Nicole E, Westbrook Cherie J y Noble Bram F Bringing science into river systems cumulative effects assessment practice [Publicación periódica] // Science Direct. - 2010. - 3 : Vol. 31. - págs. 172-179.

Sierra V Fabio E, Sierra A Adriana F y Guerrero F Carlos A Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica [Publicación periódica] // Informador Técnico. - 2011. - págs. 73-85.

UNESCO Guía metodológica para la elaboración del Balance Hídrico de América del Sur [Libro]. - Montevideo : Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe, 1982.

UPME Informe de gestión #2018 [Informe]. - Bogotá : [s.n.], 2018.

USAENE Evaluar y proponer los criterios y características de los posibles desarrollos de energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos [Informe]. - Bogotá : UPME, 2017.

Vergara Blanca Janeth Yepes Impactos acumulativos, estado del arte. - Medellín : Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia, 2012.

Vitora Vicente Conesa Fernández - Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental [Libro]. - Madrid : Ingeniería sanitaria y ambiental, 2006.