

Efecto del cambio climático sobre la cuenca alta del río Pasto, departamento de Nariño, Colombia

Juan Pablo Toro Martínez¹

Resumen

Actualmente, la cuenca alta del río Pasto es fuente abastecedora de agua de consumo humano para el municipio de Pasto, capital del departamento de Nariño. Por esta razón, este estudio tuvo como objetivo principal, evaluar el efecto del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Pasto para el año 2050, haciendo uso del modelo hidrológico Soil Water Assessment Tool y la proyección climática a futuro del Modelo de Circulación General, HadGEM2-ES con la reducción de escala por el método estadístico de MarkSim®. Finalmente, se identificó que, la disponibilidad hídrica superficial tanto para el periodo 1985-2015 y el escenario de Trayectorias de Concentración Representativas 8.5 al año 2050, se encuentran bajo escasez severa. En ese sentido, en el 2050, la disponibilidad de agua dulce renovable per cápita anual se reduciría en un 49,57 %, lo que podría afectar negativamente el suministro y calidad del agua, los alimentos y la capacidad de uso del suelo. Por lo tanto, se debe establecer medidas de conservación y restauración de suelos y de la cobertura vegetal y, tecnificar los sistemas productivos de la zona alta de la cuenca.

Palabras clave: cambio climático; herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT); modelación hidrológica; proyección climática; recursos hídricos.

Introducción

Los escenarios de cambio climático desarrollados recientemente a través de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) pronostican un aumento de la temperatura del aire de hasta 5 °C y cambios en los patrones de lluvia (incrementos en las regiones de latitudes altas y disminuciones en las regiones de latitudes medias) hasta 2100. El efecto del cambio climático

¹ Universidad de Manizales, Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Correo electrónico: juanpablodx63@yahoo.com.co



será considerable para los países de América Latina, debido a su dependencia económica de la agricultura y, dado que el clima, el agua dulce y los sistemas biofísicos y socioeconómicos están intrincadamente interconectados, un cambio en uno de ellos induce un cambio en otro (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático -IPCC, por sus siglas en inglés, 2014; Erol y Randhir, 2012; Lehmann et al., 2013; Reed et al., 2013; Cai et al., 2016; Magrin et al., 2014; Marin et al., 2020; Bates et al., 2008).

En la actualidad, la relación entre el cambio climático y los recursos de agua dulce suscita una preocupación y un interés de primer orden. La cantidad y la calidad del agua es de plena importancia dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas y CEPAL (2018), mencionados directamente en el ODS 6 y, secundariamente, dentro de los ODS 3, 11, 12 y 15; por ello, para permitir que la gestión del agua haga frente a los desafíos futuros, el efecto del cambio climático debe cuantificarse desde las escalas regionales a las locales (cuencas) (Bates et al., 2008; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD, 2015; Marin et al., 2020; Kumar et al. 2017).

El uso de los modelos permite un enfoque sistemático, con el objetivo de cerrar la brecha existente entre la teoría y las observaciones. Una herramienta importante para asegurar la demanda de agua para los próximos años está representada por la modelización hidrológica. La Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT, por sus siglas en inglés: *soil and water assessment tool*) es uno de esos modelos a escala de cuencas hidrográficas, desarrollado para estudiar la hidrología de estas cuencas y, el ciclo de nutrientes, en respuesta a los escenarios de manejo agrícola, cambio de uso de la tierra y clima y, es comúnmente y cada vez más utilizado, para estimar las influencias hidrológicas del cambio climático (Yang et al., 2005; Arnold et al., 2007; Xu et al., 2018).

Así, el modelo SWAT ha demostrado ser una de las herramientas más adecuadas para investigar y simular la respuesta de la corriente de una cuenca al cambio climático. Los componentes principales del modelo pertinente para el análisis hidrológico incluyen: clima, hidrología, crecimiento de plantas, manejo de la tierra, canalización y enrutamiento del reservorio. El modelo permite realizar modificaciones a los datos climáticos de entrada, elevación para tomar en cuenta el efecto orográfico sobre la precipitación (PRECIP) y temperatura, manipular los insumos del clima para simular el cambio climático y, predecir patrones climáticos futuros (Zhang et al., 2016; Pandey et al., 2019; Neitsch et al., 2005; Gassman et al., 2007).

Con relación a lo anterior, en todo el departamento de Nariño se espera a futuro, incrementos en la temperatura promedio para el año 2050, con valores entre 1,9 °C y 2,3 °C, lo que puede generar estrés por aumento de la temperatura en la subregión centro y amazónica. También se prevé una tendencia a la disminución en la PRECIP en los municipios de la región suroccidental, central y amazónica del departamento, por lo cual puede darse un desabastecimiento de agua para consumo humano, uso agrícola y pecuario (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, 2010; 2015).





La alteración del ciclo hidrológico por el cambio climático podría causar impactos sustanciales en la disponibilidad de los recursos hídricos; además, podría haber modificaciones en la escorrentía superficial (SURQ) (IPCC, 2014). Ante esta problemática, la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO, 2008) afirma que, la cuenca del río Pasto debe ser priorizada puesto que, tiene una muy alta importancia a nivel departamental, por ser el primer soporte de suministro actual del recurso hídrico para el municipio de Pasto, en virtud de lo cual presenta una alta vulnerabilidad climática global; es decir, posee una alta vulnerabilidad socioeconómica y ambiental, indicando principalmente, un alto grado de pérdida o transformación de sus condiciones naturales, por lo que enfrenta mayores presiones y amenazas, dadas las dinámicas y procesos de desarrollo (Guevara et al., 2016).

Tomando en consideración los aspectos expuestos, es de suma importancia la cuantificación temporal y espacial de los componentes del ciclo hidrológico en la cuenca alta del río Pasto y la disponibilidad hídrica en el presente y futuro, ya que, con ello se aporta a la planificación territorial, al ordenamiento de la cuenca como medio natural y satisfactor de necesidades básicas y, al conocimiento de la magnitud de esta problemática en esta cuenca, fuente abastecedora de agua de consumo humano para el municipio de Pasto.

Desarrollo

Área de estudio

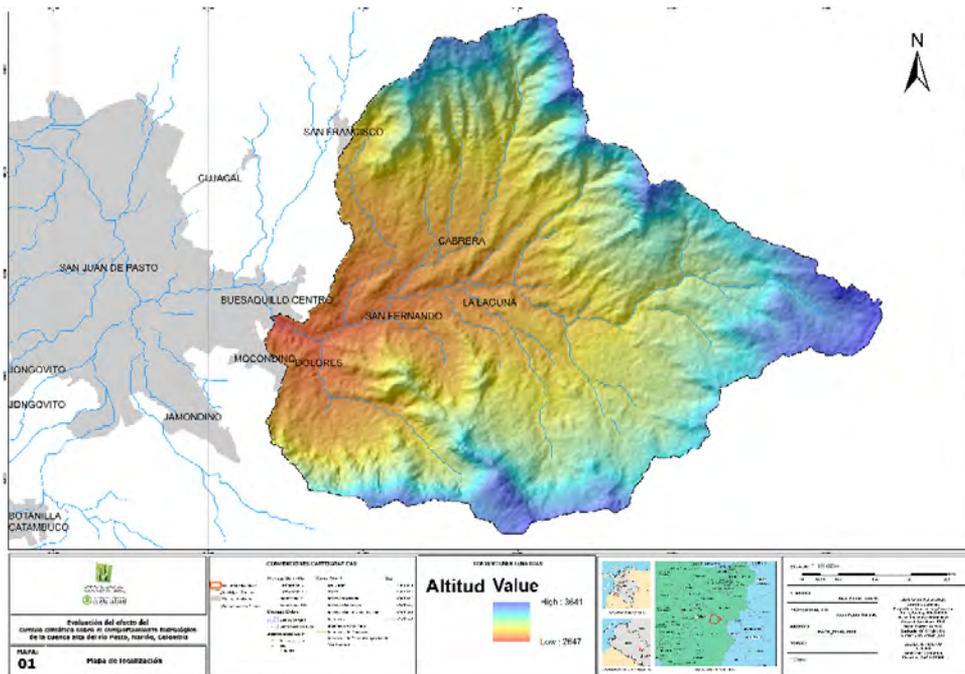
La cuenca del río Pasto se localiza al noroccidente del municipio de Pasto, como afluente del río Juanambú, dentro de la gran cuenca del río Patía. La cuenca del río Pasto tiene en total 48.258,6 ha; en esta se ubican 431.114 habitantes, que hacen parte de seis municipios, incluida la capital del departamento de Nariño. Del flujo principal del río Pasto se capta en la bocatoma El Centenario, el agua para abastecer gran parte de la ciudad de San Juan de Pasto (85 %) y cinco corregimientos (Cabrera, La Laguna, San Fernando, Dolores y Mocondino) (CORPONARIÑO, 2011; Moreno, 2013).





Figura 1

Mapa de ubicación de la cuenca alta del río Pasto, departamento de Nariño, Colombia



Metodología

Caracterización climática de la cuenca alta del río Pasto

Los datos de entrada del modelo SWAT son considerados la parte fundamental de esta investigación. Con respecto a la identificación de las variables climatológicas, estas fueron realizadas a partir de los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca y sus alrededores, administradas por el IDEAM, con registros del periodo 1985-2015 (30 años), adaptados de Ocampo (2012).

Las variables climáticas requeridas fueron: brillo solar, humedad relativa, PRECIP total, temperatura (máxima, mínima y media) y radiación solar, las cuales fueron sometidas a un análisis exploratorio gráfico (Gráfica de normalidad), un análisis confirmatorio (Prueba de normalidad Shapiro-Wilks) a través del software Infostat y, finalmente, un ajuste por mínimos cuadrados para completar los datos faltantes en los casos en los que fue necesario, que, en su mayoría, no excedieron el 15 % del total. Con estos datos, se procedió a realizar la distribución espacial y el cálculo de las variables climáticas en la cuenca alta, para lo cual se aplicó la técnica de interpolación por método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW) (Ocampo, 2012; Tabios y Salas, 1985).



La radiación solar fue calculada a escala diaria para cada una de las estaciones, partiendo de los registros de brillo solar y humedad relativa, empleando el modelo matemático recomendado por Ocampo (2012), elaborado por Swartman y Ogulande (1966), quienes proponen la siguiente ecuación:

$$H = 464 + 265 D - 248 R$$

...donde:

H: Radiación solar (langleys/min) (cal/cm².min)

D: Número de horas de brillo solar/12

R: Humedad relativa

Se resalta que, para el cálculo de la temperatura en la zona de estudio, fueron elaboradas las isotermas, tomando en consideración el gradiente altitudinal y los datos de las estaciones meteorológicas (Tabla 1), de acuerdo con la metodología propuesta por Fries et al. (2009).

Finalmente, una vez obtenida la distribución espacial y los valores dentro de la cuenca alta, se efectuó el análisis de la estadística descriptiva, considerando el período 1985-2015, a escala mensual y anual, empleando el software InfoStat (versión 2020), adaptado de Ocampo (2012). A continuación, se presenta las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio:

Tabla 1

Estaciones meteorológicas utilizadas, periodo (1985-2015)

Latitud	Longitud	Altitud (m s.n.m.)	Nombre	Código	Parámetros (Escala diaria)
1.39408333	-77.29086111	1796	Aeropuerto Antonio Nariño	52045020	Precipitación Temperatura
1.16	-77.27880556	2820	Botana	52055040	Humedad relativa
1.15994444	-77.16147222	2830	El Encano	47015100	Brillo solar
1.19822222	-77.30308333	2710	Obonuco	52045010	
1.20138889	-77.24777778	2740	Bocatoma Centenario	52047030	Caudal

Fuente: elaboración propia

Aplicación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca alta del río Pasto

Las características físicas de la cuenca alta del río Pasto fueron obtenidas, en primera instancia, a partir de la revisión de fuentes primarias y secundarias; en especial, el Plan de ordenamiento del cauce principal del río Pasto (CORPONARIÑO, 2008;



2011) y el Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Juanambú (2017), realizados por CORPONARIÑO. Esta información fue solicitada, contrastada y ajustada siguiendo los requerimientos de este estudio e, información derivada a partir de imágenes satelitales provenientes del sensor Maxar del año 2016 y Sentinel-2 del año 2017 (ID: L1C_T18NTG_A010790_20170716T154039), para la actualización y obtención de mayor detalle de la cobertura vegetal de la cuenca.

Las categorías de uso y cobertura de la tierra fueron reclasificadas de acuerdo con el listado de especies de plantas, disponible en la base de datos de SWAT, los cuales se encuentran en el apéndice A de SWAT (2012), en donde se agrega al modelo, la información fisiológica de las plantas, como el crecimiento vegetal, el agua de la zona de la raíz, la transpiración y producción de biomasa (González, 2016).

En segunda instancia, se obtuvo el Modelo de Elevación Digital (DEM) de alta resolución (12,5m) a partir de la plataforma *Alaska Satellite Facility*, conseguido a través del sensor ALOS PALSAR.

En cuanto a la información edafológica, esta fue obtenida usando las herramientas de procesamiento y, tomando como referente, la información reportada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2017) (escala 1:100.000), CORPONARIÑO (2011) (escala 1:25.000), Moreno (2013) (escala 1:25.000) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2013) (escala 1:5.000.000). Adicionalmente, se acopló en el modelo, la base de datos meteorológica global *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), la cual posee datos climáticos diarios desde 1979 a 2014 (Reshmidevi et al., 2018).

Calibración y validación del modelo SWAT para la cuenca alta del río Pasto

Parte fundamental del modelo, es calibrar y validar los valores obtenidos; para ello, fue necesario ajustar el modelo inicial, partiendo de los escenarios observados y simulados. En este caso, la calibración se realizó con el algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Version 2*) haciendo uso del software SWAT-CUP 2019, versión 5.2.1 (*SWAT Calibration, Uncertainty Procedures*). Este es un procedimiento de modelado inverso semi-automatizado que combina optimización (calibración y análisis de sensibilidad) y análisis de incertidumbre.

La estación empleada para la calibración y validación fue la de la salida de la cuenca alta; en este caso, la estación limnigráfica de la bocatoma Centenario, haciendo uso de los valores del caudal diario para un periodo de calibración de cuatro años y un periodo de validación de los cuatro años siguientes. Para llevar a cabo la verificación del modelo, se utilizó como parámetro de entrada, aquella combinación que arrojó un mejor ajuste en la etapa de calibración, lo cual permitió corroborar el ajuste que presenta el modelo al simular el comportamiento de la cuenca para otros años diferentes a los utilizados para ser calibrado (González, 2016; Moreno, 2013).





En cuanto al análisis estadístico para conocer el ajuste del modelo, se aplicó las pruebas del coeficiente de Nash-Sutcliffe, porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales fueron obtenidos tanto para los periodos de calibración, como de validación (González, 2016).

Estimación del efecto del cambio climático sobre la respuesta hidrológica de la cuenca alta para el año 2050

Para la obtención de las condiciones esperadas bajo los escenarios de cambio climático futuro en la cuenca alta, se hizo uso del Modelo de Circulación General (GCM) HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model versión 2, Earth System Model) con la reducción de escala por el método estadístico de la plataforma MarkSim® (González, 2016; Jones y Thornton, 2013). Este modelo posee información de dirección, magnitud e incertidumbre de las anomalías de temperatura de los 17 modelos contenidos en toda la plataforma MarkSim® (Stocker et al., 2013).

Para estimar el efecto del cambio climático sobre la respuesta hidrológica, se comparó las salidas del modelo hidrológico SWAT de la línea base (1985-2015) y el escenario futuro RCP 8.5 al año 2050, bajo el modelo con reducción de escala HadGEM2-ES, adaptado de González (2016).

Identificación de la disponibilidad hídrica per cápita para uso humano año 2050

Para este aspecto se usó el indicador de disponibilidad de agua dulce renovable per cápita (AWR), desarrollado por Falkenmark et al. (1989), que establece la relación entre la población y la cantidad de agua disponible en las principales fuentes de agua, medida en términos de SURQ (Tabla 2) (FAO, 2013; UNESCO, 2009; Ocampo, 2012; González, 2016).

Para ello, se utilizó la producción de agua media (WYLD) obtenida por simulación hidrológica, como oferta hídrica superficial (González, 2016). Para conocer la población del escenario futuro se aplicó el método exponencial que se encuentra descrito en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS Título B (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014), haciendo uso de la proyección poblacional del municipio de Pasto, dispuesta en la base de datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2007), desde el año 2005 hasta el año 2020, con el fin de obtener el valor esperado para el año 2050.



**Tabla 2**

Categorías del índice de disponibilidad per cápita de agua

Índice de disponibilidad per cápita de agua (m ³ /hab-año)	Categoría	Observación
1700 - 1001	Estrés Hídrico	Ampliar las medidas de adaptación y adecuar dispositivos para el aprovechamiento de aguas lluvias y subterráneas.
1000 - 501	Escasez de agua	Implementar medidas de ahorro y uso eficiente del agua.
< 500	Escasez severa de agua	Existen problemas imposibles de superar; el desarrollo económico se restringe fuertemente.

Fuente: elaborado a partir de información del IDEAM (2008); Ocampo (2012)

Resultados

Condiciones climáticas de la cuenca alta durante el periodo 1985-2015

A partir de la información de estas estaciones y su procesamiento a través del método IDW (para el caso de PRECIP, humedad relativa y brillo solar), el método de Fries et al. (2009) (para temperatura) y, el método de Swartman y Ogulande (1966) (para radiación solar), se determinó las condiciones climáticas de la cuenca alta en donde, a nivel estadístico, se presenta los siguientes resultados:

Tabla 3

Estadística descriptiva para los parámetros climáticos multianuales de la cuenca alta del río Pasto, periodo 1985-2015

Parámetro	Precipitación total anual (mm/año)	Temperatura media anual (°C)	Humedad relativa media anual (%)	Brillo solar total anual (hora/año)	Radiación solar media diaria (kWh/m ²)
Años evaluados	31	31	31	31	31
Media	1124.6	9.7	82.71	973.32	3.77
Mínimo	780.73	9.13	80.41	652.96	3.63
Máximo	1558.32	10.16	84.69	1163.91	3.88
Mediana	1094.22	9.71	82.88	1007.23	3.77



Desviación estándar	173.01	0.23	1.05	125.82	0.07
Error estándar	31.07	0.04	0.19	22.6	0.01
Coefficiente de variación	15.38	2.36	1.27	12.93	1.75

Fuente: este estudio

La Tabla 3 evidencia que, la media de la PRECIP total anual de la cuenca alta del río Pasto es de 1124.6 mm/año \pm 173.01 para el periodo 1985-2015, donde se aprecia una alta variabilidad temporal a nivel anual, representada por el coeficiente de variación, permitiendo inferir que, la PRECIP es la que presenta mayor dispersión en los datos, debido a la presencia de años con eventos marcados de más lluvias y menos lluvias en la zona de estudio, lo cual pudo tener repercusiones en la disponibilidad de agua para consumo humano y los requerimientos del ecosistema y los agroecosistemas. En este sentido, la diferencia entre el año con mayores lluvias y menores es de 777.59 mm, lo que equivale a un rango de variación de hasta el 49,9 %, que corresponde a los años 1999 y 1992, respectivamente.

En cuanto a la temperatura media anual de la cuenca alta del río Pasto desde el año 1985 hasta 2015 es de 9.7 °C \pm 0.23. En este aspecto, se resalta el comportamiento creciente durante los años 2014 y 2015, evidenciando diferencias de hasta 1.03 °C entre el año más cálido, es decir, el año 2015 y el año más frío, el cual corresponde a 1985, mostrando un rango de variación de hasta el 10,13 %.

Referente a eventos extremos en la cuenca alta del río Pasto, se puede distinguir que, los años con la reducción más drástica en la PRECIP, son: 1992, 2015 y 1995, con un cambio porcentual del -30,57 %, -20,94 % y -20,76 %, respectivamente (Figura 2); sin embargo, también se observa una disminución de la PRECIP durante el periodo 2001-2004, con valores por debajo de la media multianual de -14,04 %, -17,41 %, -16,06 % y -9,89 %, lo cual concuerda con lo reportado por Duque (2016) y el Plan de manejo ambiental integral, Humedal Ramsar Laguna de La Cocha (Álvarez, 2015), en donde se reporta una disminución en las lluvias en 1991-1993, 2001 y 2004. A su vez, el IDEAM (2018) afirma que, el fenómeno de El Niño a nivel nacional tuvo su más fuerte manifestación en los años 1991-1992, 1997-1998, 2009-2010 y 2015-2016, en donde hubo grandes eventos de sequía.

Por otra parte, los años en los que la zona de estudio evidencia valores por encima de la media están en: 1999, 2011, 1996 y 2008, en donde se observa incrementos en la PRECIP, de 38,56 %, 27,94 %, 19,6 % y 19,17 %, años en los que, según las referencias anteriores, se presentaron los efectos del fenómeno de variabilidad climática de La Niña (Figura 2).

Respecto a lo anterior, la alta variabilidad en la PRECIP implica que, lo más predecible es que en la zona de estudio solo sobrevivan aquellas especies adaptadas al estrés hídrico y a eventos con exceso de lluvias, aspectos que deben

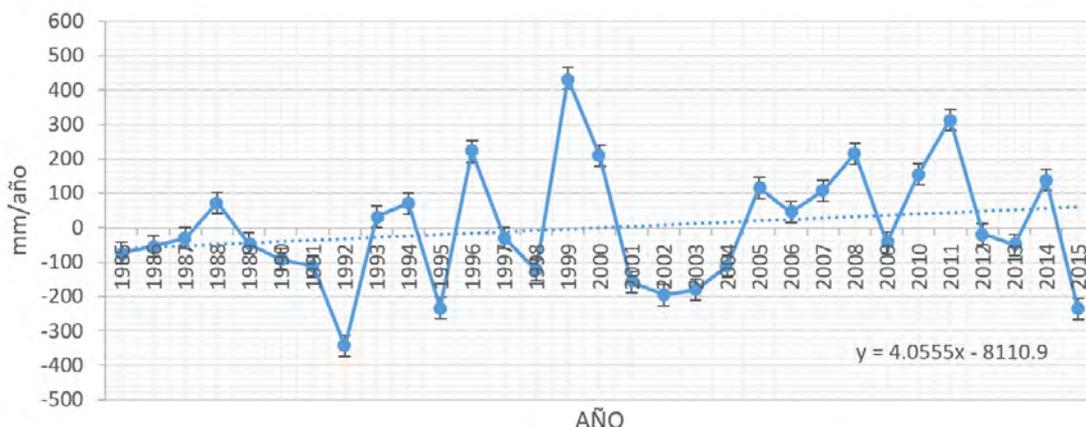
ser tenidos en cuenta al momento del establecimiento de un cultivo o, cuando se trate de la protección y conservación de las coberturas naturales existentes (Ruiz y Molano-González, 2017).

Por su parte, en el comportamiento de la temperatura se puede observar valores por encima de la media anual, especialmente durante los años 2015, 1998, 2014 y 1987, con incrementos porcentuales del 4,76 %, 3,93 %, 3,52 % y 3,52 % respectivamente, fechas en las cuales se presentó el fenómeno de El Niño (Figura 3). En cuanto a los años con temperaturas por debajo de la media multianual, estos se manifestaron durante 1985, 1999, 2000 y 2008, con reducciones de -5,85 %, -3,38 %, -3,17 y, -3,17 %, respectivamente. Al respecto, el IDEAM (2018) sostiene que, los años en donde el fenómeno de La Niña se reveló de manera más fuerte, fue durante 1988-89, 1998-99, 2000-01, 2007-08, 2010-11, 2011-12, coincidiendo en su mayoría, con los resultados de esta investigación.

En este sentido, se debe enfatizar en la necesidad de un análisis de la influencia del cambio de uso y cobertura del suelo, debido a efectos de las características naturales de la superficie. Así, los efectos sobre el comportamiento hidrológico no solo son explicados por los eventos climáticos, sino también por los cambios en la cobertura del suelo en la cuenca, específicamente, los relacionados con la remoción de la cobertura vegetal natural, la expansión de las zonas bajo cultivos, el sobrepastoreo y el aumento del área bajo uso residencial, de lo cual se prevé que puede provocar un aumento de la transpiración y, con ello, la disminución del caudal base. No obstante, se ha observado que los caudales durante las épocas de menos lluvias muestran tendencias decrecientes en el flujo superficial, lo cual incrementa claramente el riesgo por desabastecimiento de agua para consumo humano (Moreno y Lourenço, 2018; Taye et al., 2015).

Figura 2

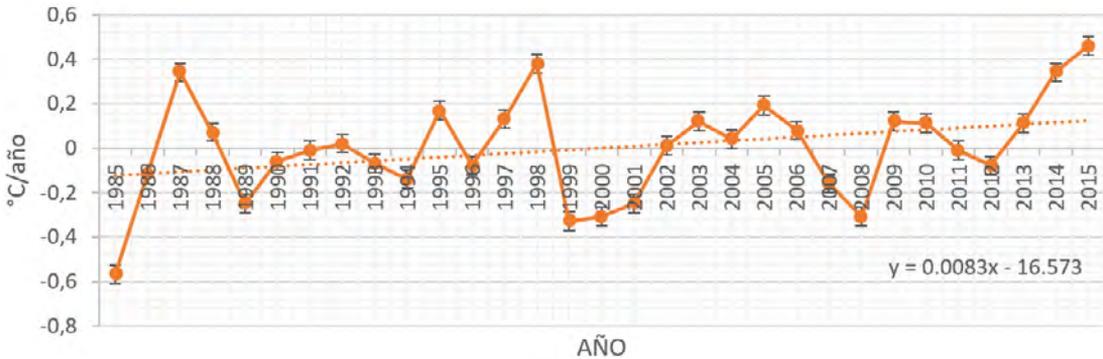
Anomalías en la precipitación total anual de la cuenca alta del río Pasto, periodo 1985-2015



Fuente: este estudio

**Figura 3**

Anomalías en la temperatura media anual de la cuenca alta del río Pasto, periodo 1985-2015



Fuente: este estudio

Calibración y validación del modelo SWAT para la cuenca alta del río Pasto

La calibración del modelo SWAT se realizó para un punto en la cuenca, con datos disponibles de descarga diaria que corresponde a la bocatoma El Centenario. Los resultados de la calibración y validación (Figura 15 y Figura 16) muestran que, el p-factor para la calibración fue del 81 % al finalizar 500 simulaciones y dos iteraciones, obteniendo así un valor superior al 70 %, que es el recomendado por la literatura, lo que asegura la representación de todas las incertidumbres de los parámetros (Abbaspour et al., 2015; Yang et al., 2008). El rendimiento de la simulación respecto a R^2 y NS fue evaluado según la clasificación establecida por Parajuli et al. (2009) y, para el caso de PBIAS, se utilizó los criterios de Moriasi et al. (2007).

Durante la etapa de calibración (1994-1998), el R^2 presentó un valor bueno; respecto al criterio de NS, este también se considera como bueno y, finalmente, el porcentaje de sesgo PBIAS se clasificó como satisfactorio. Durante la validación (1999-2003) se obtuvo un R^2 bueno con 0,52, un NS aceptable con 0,49 y, un PBIAS que se considera bueno, con 11,34. Bajo este criterio, se considera los estadísticos más importantes dentro del ajuste hidrológico, la eficiencia de Nash-Sutcliffe y el porcentaje de sesgo, debido a que el R^2 no brinda información sobre la dirección de la relación entre las variables (Molnar, 2011; Moriasi et al., 2007; Abbaspour et al., 2004).

En este caso, la diferencia en los ajustes de los caudales puede deberse a la alta actividad antrópica en la zona, que incluye la extracción de agua para consumo doméstico, consumo animal y riego. De la misma manera, se cree que las pequeñas subestimaciones pueden ser consecuencia de la alta porosidad y las altas conductividades hidráulicas presentes en los suelos de la cuenca, lo que provoca que el modelo SWAT interprete la existencia de una mayor infiltración de agua hacia el subsuelo y que esta no sea redirigida a los caudales principales.



Tabla 4

Estadísticos del ajuste hidrológico del modelo SWAT en la cuenca alta del río Pasto

Periodo de análisis	Fase del modelo	R ²	NS	PBIAS
1994-1998	Calibración	0.67	0.52	20.44
1999-2003	Validación	0.52	0.49	11.34

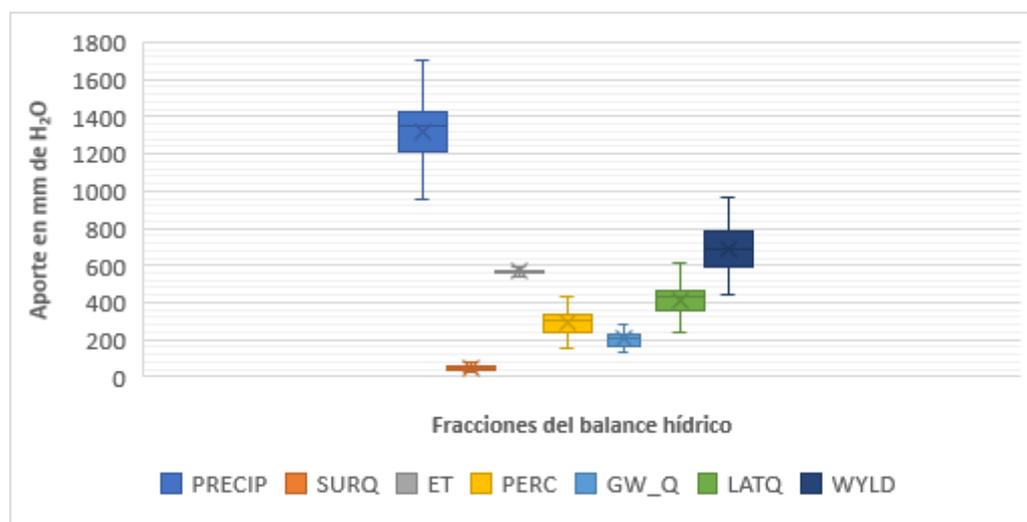
Fuente: este estudio

Estimación del efecto del cambio climático sobre la respuesta hidrológica de la cuenca alta para el año 2050

El aporte medio anual de las fracciones del balance y WYLD en la cuenca alta del río Pasto durante la línea base de simulación (1985-2015) se muestra en la Figura 4, donde el 52 % de la PRECIP se convierte en WYLD. Esta se compone de 7,03 % de SURQ, 29,81 % de flujo base (GW_Q) y, 60,46 % de escorrentía lateral (LATQ). La evapotranspiración actual (ET), percolación (PERC) y recarga de acuíferos representan (GW_RCHG) el 42,96 %, 21,88 % y 20,09 % de la PRECIP pluvial, respectivamente. La recarga hídrica (GW_RCHG) anual en el período base es igual a 264.65 mm.

Figura 4

Aporte medio anual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua en la línea base (1985-2015) en la cuenca del río Pasto



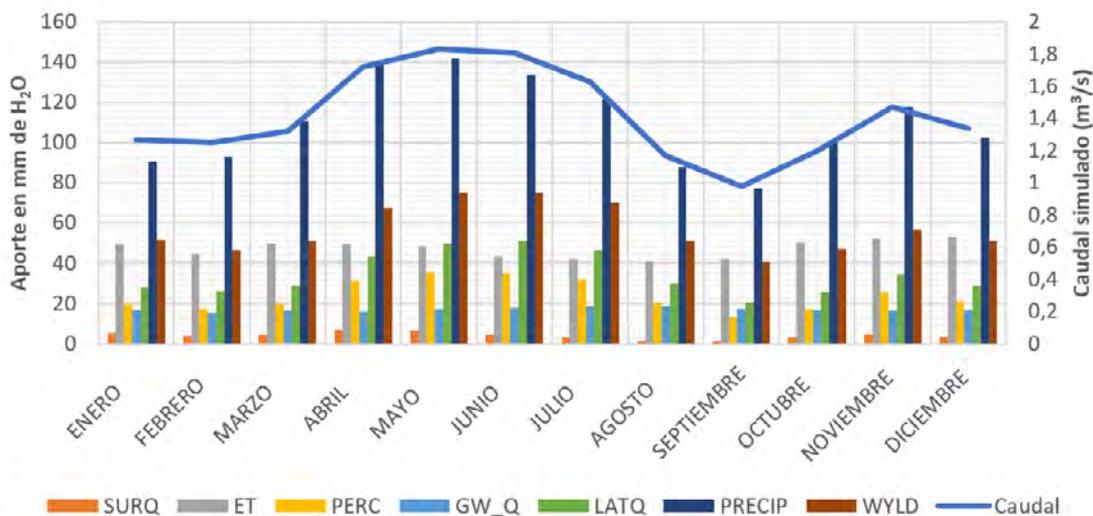
Fuente: este estudio

Por otro lado, se tiene el aporte promedio de la línea base a lo largo del año (Figura 5), donde la PRECIP mínima del periodo base ocurre en septiembre, con 77.47 mm y la máxima en mayo, con 141.87 mm. A su vez, la mínima WYLD fue en septiembre

(40.73 mm) y la máxima en mayo (75.17 mm). En cuanto a la evapotranspiración mínima, esta se observó en agosto con 41.19 mm y la máxima en diciembre con, alrededor de 52.92mm. Finalmente, el caudal simulado medio anual en la salida de cuenca alta del río Pasto fue 1.41 m³/s, presentándose los valores más altos durante el mes de septiembre con 0.98 m³/s y máximos en mayo con 1.83 m³/s.

Figura 5

Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual de la línea base de simulación (1985-2015), en la cuenca alta del río Pasto



Fuente: este estudio

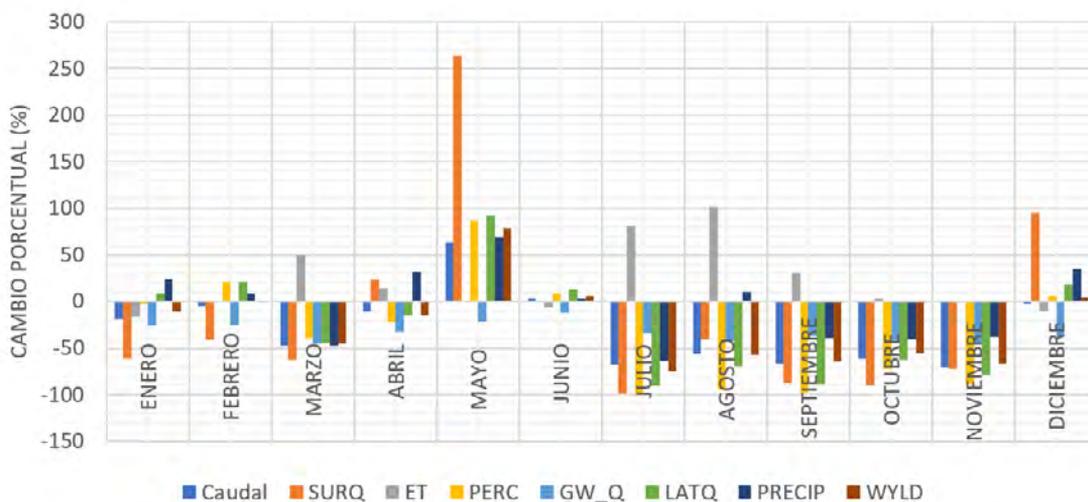
Para evaluar el efecto del cambio climático futuro se comparó las salidas del modelo hidrológico SWAT de la línea base (1985-2015) y, el escenario futuro RCP 8.5 al año 2050, bajo el modelo con reducción de escala, HadGEM2-ES. A través de ello, se obtuvo que, para el año 2050 se tiene cambios anuales de -1,94 %, +19,01 %, -21,23 % y -26,11 % para PRECIP, ET, WYLD y PERC, respectivamente. De esta forma, la Figura 6 muestra el cambio medio durante el año 2050; la PRECIP en junio presentará el menor cambio, +3,19 % (4.26 mm) y el máximo en mayo (+68,65 %) y julio (-63,36 %), 97.4 mm y -76.98 mm, correspondientemente, aunque mayo seguirá siendo el mes más lluvioso con 239.27mm. La evapotranspiración real (ET) tendrá su mayor cambio en agosto, con +102,26 % (42.12 mm); y el mínimo cambio en noviembre, -0,19 % (0.1 mm). La WYLD experimentará su más drástico cambio en julio, -74.53 % (-52.43mm); sin embargo, se observa disminuciones considerables durante todo el periodo de julio a noviembre; caso contrario sucede en febrero, en donde se presenta el cambio más pequeño con un +0,06 % (0.03 mm). A partir de ello, se infiere que, el balance hídrico en esta área de estudio se vio afectado no solo por la PRECIP, sino también, porque fue sensible al cambio de temperatura.

En esta forma, se puede resaltar que las actividades agrícolas intensivas como los monocultivos y el pastoreo presentes en la zona, pueden reducir la rugosidad de la superficie de la tierra y disminuir el almacenamiento de agua del suelo; adicionalmente, la pérdida de cobertura forestal disminuye la capacidad para interceptar la PRECIP, lo que permite que una mayor SURQ ingrese en los arroyos. Por ello, una gestión integral de las cuencas hidrográficas, especialmente bajo protección y conservación, sería la clave para asegurar una fuente confiable de agua en cantidad y calidad (Baker y Miller, 2013; Busman y Sands, 2002; Ghaffari et al., 2010; Ahiablame et al., 2017; Zhou et al., 2011).

Ante estos resultados, es útil comprender los cambios en el balance hídrico, acoplado el cambio climático con las dinámicas de uso y cobertura de la tierra para así, planificar bajo una gestión integral del agua combinada, con la gestión del riesgo climático. Se recomienda, en el menor tiempo posible, establecer medidas de conservación de suelos y de la cobertura vegetal de la zona alta, con el fin de anticiparse a los probables impactos negativos.

Figura 6

Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico para el escenario RCP 8.5 al año 2050, con respecto a la línea base (1988-2015), en la cuenca alta del río Pasto



Fuente: este estudio

Por otra parte, la Tabla 5 permite inferir que, a lo largo del año, bajo el escenario RCP 8.5 a 2050, en la cuenca alta del río Pasto se espera que la variabilidad incremente levemente para GW_Q (6-15 %), moderadamente para ET (entre 15 % y 35 %) y, severamente para SURQ, PERC, Flujo lateral (LATQ), WYLD, Caudal (Q) y PRECIP (> 35 %). A partir de ello, se debe resaltar que, los resultados de la simulación conducen a una alta variabilidad entre los valores de escorrentía superficial y caudal, por lo cual se puede esperar un aumento bastante alto de la descarga,



que incrementará el riesgo de inundaciones en áreas bajas y también de sequías fuertes; de la misma forma, las altas incertidumbres de los cambios esperados en la lluvia se traducen en altas incertidumbres en los cambios simulados de la descarga y otros componentes del balance hídrico.

Aun así, se debe enfatizar que, los efectos esperados por el cambio climático, combinados con el uso y cobertura de la tierra, pueden intensificar las respuestas futuras de los caudales; a manera de ejemplo, en la cuenca del río James en Estados Unidos, el cambio de uso del suelo conduciría a un aumento del 6 % al 8 % en el caudal anual en 2055 y, del 12 % al 18 % en 2090. Adicionalmente, es probable que el cambio climático provoque un aumento del 8 % al 48 % para mediados de siglo y, un aumento del 17 % al 41 % en el caudal anual para fines del siglo. En este caso, se infiere que, el impacto del uso futuro del suelo y el cambio climático sugieren notables alteraciones hidrológicas durante el siglo XXI, donde el cambio climático representaría un papel principal en la alteración del caudal (Ahiablame et al., 2017).

Tabla 5

Coficiente de variación (CV) durante para la línea base y escenario futuro RCP 8.5 a 2050, modelo HadGEM2-ES para la cuenca alta del río Pasto

Variable	Media mensual	Línea base (1988-2015)		RCP 8.5 al 2050	
		CV (%)	Media mensual	CV (%)	
Q	Caudal m ³ /s	1.42	19.39	1.07	72.68
SURQ	Escorrentía superficial (mm)	4.01	45.91	4.37	154.36
ET	Evapotranspiración real (mm)	47.16	8.88	56.13	25.23
PERC	Percolación (mm)	24.02	31.58	17.75	109.49
GW_Q	Flujo base (mm)	17.02	6.55	11.33	16.92
LATQ	Flujo lateral (mm)	34.52	30.29	27.98	96.94
PRECIP	Precipitación (mm)	109.78	19.29	107.64	55.08
WYLD	Producción de agua (mm)	57.09	20.8	44.97	76.72

Fuente: este estudio

En la línea base se observa que la época de más lluvias se concentra durante aproximadamente cuatro meses, que van desde abril hasta julio; no obstante, en el escenario futuro (Figura 7) se visualiza que, este periodo se ubica únicamente entre los meses de abril a junio, resaltando que, en el año 2050, las precipitaciones medias mensuales durante esa temporada serán mucho más altas que las

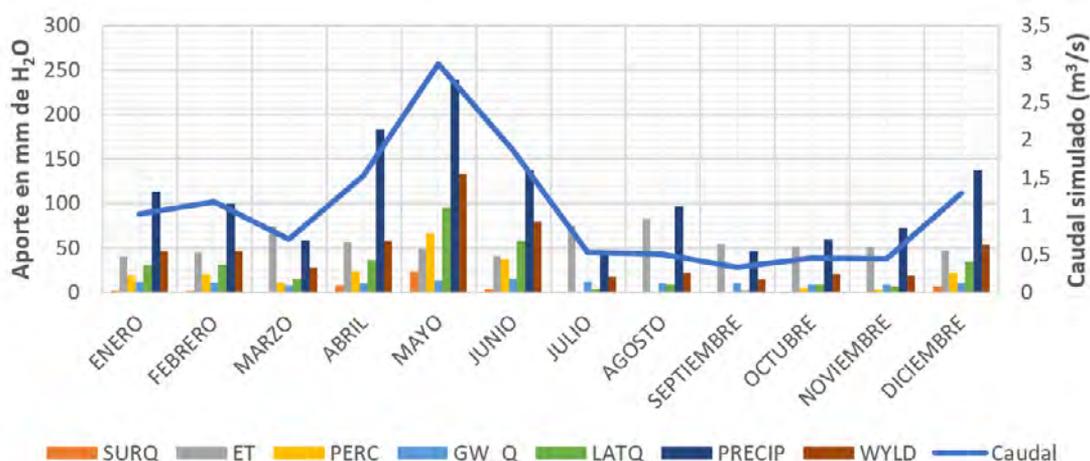
registradas durante la línea base, con un incremento cercano al 4,5 % en esos meses. Se resalta que, la diferencia entre el mes más lluvioso de la línea base y el del año 2050 es de 97.4 mm (mayo); esto puede atribuirse a la naturaleza compleja de los procesos de PRECIP y su distribución en el espacio y el tiempo (Chaemiso et al., 2016).

En cuanto a las épocas de menos lluvias, se observa un fenómeno opuesto, en donde en el año 2050 se esperaría meses mucho más secos que los registrados durante la línea base, con disminuciones de aproximadamente el -23,42 % durante agosto a octubre. Cabe enfatizar que, la diferencia entre el mes más seco de la línea base y el escenario futuro (septiembre), es de -30.71 mm (-39,64 %).

En ese orden de ideas, durante la época de más lluvias, la ET presenta un incremento de 21,17 % (38.84 mm); en cuanto a la época de menos lluvias, se espera un incremento del 42,55 % (56.84 mm). Por su parte, la WYLD disminuirá -17.17 mm (-5,95 %) en la época de más lluvias y, -81.6 mm (-58,56 %) en la temporada de menos lluvias. Se pretende que estos hallazgos contribuyan al desarrollo y aplicación de políticas efectivas de gestión del riesgo del cambio climático por parte del gobierno local, de acuerdo con el potencial de inundaciones y sequías en la cuenca.

Figura 7

Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual del escenario futuro RCP 8.5 a 2050, modelo HadGEM2-ES en la cuenca alta del río Pasto



Fuente: este estudio

Identificación de la disponibilidad hídrica per cápita para uso humano, año 2050

La disponibilidad hídrica superficial para la cuenca del río Pasto se puede apreciar en la Tabla 6; actualmente, se tiene un promedio de 685,1 m³/año. Por el contrario, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES, al año



2050 se sugiere que la disponibilidad hídrica superficial de la cuenca sería de $539.61 \text{ m}^3/\text{año}$, representando un cambio de $-21,23\%$, equivalente a una reducción de 145.49 m^3 .

Al presente, la disponibilidad de agua superficial per cápita anual en la cuenca alta del río Pasto es de 213.26 m^3 , encontrándose bajo escasez severa (IDEAM, 2008). Bajo este entendimiento, se prevé que se está realizando una sobreexplotación del agua de la cuenca, la cual para el año 2015 proveía de este bien a 277.357 personas.

En los años de incidencia de los eventos extremos, la cuenca alta presentó, entre el periodo 2008-2015, valores per cápita entre 180.92 m^3 y 318.01 m^3 (263.168 usuarios), evidenciando la problemática de escasez severa del agua debido a la alta demanda por parte del municipio de Pasto y sus corregimientos. Así, los valores presentados, corresponden a los años 2015 y 2011, años que sugieren efectos del fenómeno de El Niño y La Niña (IDEAM, 2018).

Ante el cambio climático al año 2050 (HadGEM2-ES, RCP8.5) en la cuenca alta del río Pasto, se supone que se agravará aún más la escasez severa del agua, disminuyendo el índice de disponibilidad per cápita en un $-49,57\%$, equivalente a una reducción de $-105.92 \text{ m}^3/\text{hab-año}$. Cabe resaltar que, este fenómeno no solo se debe a los efectos del cambio climático como tal, sino también, al crecimiento poblacional que se espera en la zona, en donde, a nivel municipal se prevé un crecimiento total en 222.387 habitantes entre 2020 y 2050, cuyo número de usuarios de la cuenca se incrementaría en, aproximadamente, 155.928, acrecentando seriamente la presión demográfica sobre la cuenca; sin embargo, resultaría interesante abordar en próximas investigaciones, un análisis más amplio, como el nexo entre alimentos, agua y energía.

En este sentido, la mitigación y la adaptación al cambio climático requieren tanto de las variables climáticas como de las variables sociales, en donde las bases de las actividades sociales se encuentran estrechamente acopladas con los sistemas naturales. De hecho, el gran desafío de abordar la sostenibilidad ambiental y global es, poder medir y modelar el sistema terrestre y sus subsistemas, e identificar los procesos y sus trayectorias de desarrollo y el impacto del cambio climático en las sociedades (Ehrlich et al., 2018).

Así, los cambios esperados podrían afectar la salud de la población directamente a través del incremento del calor, intensificación de las sequías o tormentas o, indirectamente, por cambios en la disponibilidad de agua, el suministro y la calidad de los alimentos. Los principales efectos en la salud podrían estar relacionados con los fenómenos meteorológicos extremos (incluidas las temperaturas altas y las posibles inundaciones), los cambios en la distribución de enfermedades sensibles al clima y los cambios en las condiciones ambientales y sociales (Linares et al., 2020).

Tabla 6

Disponibilidad hídrica superficial en la cuenca alta del río Pasto para el periodo 1988-



2015 y bajo un escenario de cambio climático a 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES

Disponibilidad hídrica	Periodo 1988-2015	Escenario 2050	Cambio (%)
Media anual WYLD (m ³ /s)	685.1	539.61	- 21.23
Usuarios de la cuenca alta	277357*	433285	56.22
Índice disponibilidad per cápita m ³ /hab-año	213.26	107.34	- 49.67

Fuente: este estudio

Nota: *Año 2015

Conclusiones

Durante el periodo 1988-2015, los parámetros climáticos multianuales con mayor variabilidad dentro de la zona de estudio fueron, en orden descendente: PRECIP, brillo solar, temperatura, radiación solar y humedad relativa.

En los años de incidencia de los eventos extremos, la cuenca alta presentó, entre el periodo 2008-2015, valores per cápita entre 180.92 m³ (2015) y 318.01 m³ (2011), evidenciando la problemática de escasez severa, años que sugieren efectos del fenómeno de El Niño y La Niña, respectivamente.

Bajo el escenario RCP 8.5 a 2050, se espera que la variabilidad incremente levemente para GW_Q (6-15 %), moderadamente para ET (entre 15 % y 35 %) y, severamente para SURQ, Percolación (PERC), LATQ, WYLD, Caudal (Q) y PRECIP (> 35 %).

La disponibilidad hídrica superficial para la línea base tiene un promedio de 685,1 m³/año; a su vez, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES, al año 2050 se presume que la disponibilidad hídrica superficial de la cuenca sería de 539.61 m³/año, representando un cambio de -21,23 %, equivalente a una reducción de 145.49 m³.

El índice de disponibilidad per cápita para el año 2050 (HadGEM2-ES, RCP 8.5) en la cuenca alta del río Pasto sugiere que se presentará una reducción de -105.92 m³/hab-año; es decir, una disminución del -49,57 %.

Se avizora que, los eventos de inundaciones repentinas pueden aumentar, según el escenario de cambio climático; de la misma manera, existe una alta posibilidad de que se produzcan intervalos de tiempo con déficit de agua.

En el menor tiempo posible, se debe establecer medidas de conservación de suelos y de la cobertura vegetal de la zona alta, con el fin de anticiparse a los probables efectos del cambio climático.



Los cambios esperados podrían afectar directamente la salud de la población, a través del incremento del calor, intensificación de las sequías o tormentas o, indirectamente, por cambios en la disponibilidad de agua, el suministro y la calidad de los alimentos y otros factores de estrés.

Se prevé que el cambio climático afecte a los sectores más vulnerables, incluida la población de la tercera edad y, las personas de escasos recursos, poblaciones para las cuales se necesita con urgencia, políticas de protección y prevención.

Referencias

- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Ahiablame, L., Sinha, T., Paul, M., Ji, J., & Rajib, A. (2017). Streamflow response to potential land use and climate changes in the James River watershed, Upper Midwest United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14, 150-166. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.004>
- Álvarez, L. F. (2015). Plan de manejo ambiental integral, Humedal Ramsar Laguna de La Cocha. <https://es.scribd.com/document/299903264/PLAN-DE-MANEJO-INTEGRAL-HUMEDAL-RAMSAR-LAGUNA-DE-LA-COCHA>
- Arnold, J. G., Srinivasan, P., Mutiah, R. S., & Williams, J. R. (2007). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Baker, T., & Miller, S. (2013). Using the soil and water assessment tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S. y Palutikof, J. (2008). *El cambio climático y el agua*. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>
- Busman, L., & Sands, G. (2002). Issues and answers. Agricultural Drainage Publication Series. <https://wrl.mnpals.net/islandora/object/WRLrepository%3A95/datastream/PDF/view>
- Cai, Y., Bandara, J., & Newth, D. (2016). A framework for integrated assessment of food production economics in South Asia under climate change. *Environmental Modelling & Software*, 75, 459-497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.024>
- Chaemiso, S., Abebe, A., & Pingale, S. (2016). Assessment of the impact of climate change on surface hydrological processes using SWAT: a case study of Omo-Gibe river basin, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), 1-15.



<https://doi.org/10.1007/s40808-016-0257-9>

- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2008). Clasificación y priorización de cuencas hidrográficas en el departamento de Nariño. <https://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DOCUMENTO%20PRIORIZACION%20DE%20CUENCAS.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2011). Plan de Ordenación del Río Pasto. <https://corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhriopasto.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2007). Estimaciones de población 2006-2007. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/Estima_municipales_06_07.pdf
- Duque, C. L. (2016). *Balace hídrico del Lago Guamués y relación de su variabilidad con precursores climáticos ENSO y PDO* [Tesis de Maestría, Universidad Mariana]. <https://studylib.es/doc/7668453/tesis-balance-h-lago-guamues-enso-pdo>
- Ehrlich, D., Kemper, T., Pesaresi, M., & Corbane, C. (2018). Built-up area and population density: Two essential societal variables to address climate hazard impact. *Environmental Science & Policy*, 90, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.001>
- Erol, A., & Randhir, T. O. (2012). Climatic change impacts on the ecohydrology of Mediterranean watersheds. *Climatic Change*, 114(2), 319-341. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0406-8>
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. *Natural Resources Forum*, 13(4), 258-267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Göttlicher, D., Nauss, T., Homeier, J., Peters, T., & Bendix, J. (2009). Thermal structure of a megadiverse Andean mountain ecosystem in southern Ecuador and its regionalization. *Erdkunde*. 63(4), 321-335. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.04.03>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., & Ahmadi, H. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24(7), 892-903. <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>
- González, E. G. (2016). *Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala* [Tesis



de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE] <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8568>

Guevara, O., Abud, M., Trujillo, A., Suárez, C., Cuadros, L., López, C. y Flórez, C. (2016). *Plan Territorial de Adaptación Climática del departamento de Nariño*. CORPONARIÑO y WWF-Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020962/Estudio%20Nacional%20del%20agua.pdf>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. Editorial Scripto, Ltda.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018*. http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2017). Análisis Geográficos. https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/analisis_geograficos_53_2017.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf

Jones, P., & Thornton, P. (2013). Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modeling applications. *Agricultural Systems*, 114, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>

Kumar, N., Tischbein, B., Kusche, J., Laux, P., Beg, M., & Bogardi, J. (2017). Impact of climate change on water resources of upper Kharun catchment in Chhattisgarh, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 189-207. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.07.008>

Lehmann, N., Finger, R., Klein, T., Calanca, P., & Walter, A. (2013). Adapting crop management practices to climate change: Modeling optimal solutions at the field scale. *Agricultural Systems*, 117, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.12.011>

Linares, C., Díaz, J., Negev, M., Sánchez, G., Debono, R., & Paz, S. (2020). Impacts of climate change on the public health of the Mediterranean Basin population - Current situation, projections, preparedness, and adaptation. *Environmental*



Research, 182. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109107>

- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J-P., Buckering, M. S., Castellanos, E. J., Poveda, G., Rubio, F., Vicuña, S., & Bertrand, A. (2014). Central and South America. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 1499-1566). Cambridge University Press.
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., Davidescu, A. A., Davidescu, S. O., Dinca, L. Cacovean, H. (2020). Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS- Título B. <http://www.minvivienda.gov.co/documents/viceministerioagua/titulob%20030714.pdf>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Institute of Environmental Engineering.
- Moreno, A. y Lourenço, R. (2018). Emisividad de radiación y efecto invernadero por la ocupación urbana del suelo en la cuenca del río Una, São Paulo. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(2). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.67060>
- Moreno, L. (2013). *Gestión integral del agua en la cuenca alta del río Pasto, mediante un esquema de pago por servicios ambientales* [Tesis de Maestría, Universidad de Nariño]. <https://sired.udenar.edu.co/2840/>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of The ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Naciones Unidas y CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y El Caribe*. Naciones Unidas.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>
- Ocampo, O. L. (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9268>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. FAO 2013.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2009). *Water in a changing world*. www.unesco.org/water/

- Pandey, V., Dhaubanjhar, S., Bharati, L., & Thapa, B. (2019). Hydrological response of Chamelia watershed in Mahakali Basin to climate change. *Science of The Total Environment*, 650, 365-383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.053>
- Parajuli, P., Nelson, N., Frees, L., & Mankin, K. (2009). Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USD-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrol. Process.* 23, 748-763. <https://doi.org/10.1002/hyp.7174>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.undp.org/publications/sustainable-development-goals-booklet>
- Reed, M. S., Podesta, G., Fazey, I., Geeson, N., Hessel, R., Hubacek, K., Letson, D., Nainggolan, D., Prell, M. G., Rickenbach, C., Ritsema, G., Schwilch, L. C., Stringer, A. D., & Thomas, A. D. (2013). Combining analytical frameworks to assess livelihood vulnerability to climate change and analyse adaptation options. *Ecological Economics*, 94, 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.07.007>
- Reshmidevi, T., Nagesh, D., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2018). Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. *Journal of Hydrology*, 556, 1192-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>
- Ruiz, J. y Molano-González, N. (2017). Dinámica de la precipitación, la temperatura y la razón de aridez (1973-2011) en un escenario de cambio global en la isla de la vieja Providencia, Colombia: ¿qué está cambiando? *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 26(1), 25-35. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v26n1.56019>
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., Bréon, F., Church, J., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J., Hartmann, DL; Jansen, E; Kirtman, B; Knutti, R; Krishna Kumar, K., ..., & Xie, S. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Swartman, R. & Ogulande, O. (1966). An investigation on packed bed collectors. *Solar energy*, 10(3), 106-110. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(66\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(66)90024-7)
- Tabios, G., & Salas, J. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Journal of The American Water Resources Association*, 21(3), 365-380. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1985.tb00147.x>
- Taye, M., Willems, P., & Block, P. (2015). Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: A review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 280-293. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.001>



- Xu, X., Wang, Y., Kalcic, M., Muenich, R., Yang, Y., & Scavia, D. (2019). Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-use watershed. *Environmental Modelling & Software*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.013>
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K., Xia, J., & Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1-2), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.012>
- Yang, T., Yu, P., & Chen, C. (2005). Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrological Processes*, 19(10), 1967-1981. <https://doi.org/10.1002/hyp.5658>
- Zhang, Y., You, Q., Chen, C., & Ge, J. (2016). Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: A case study in Xin River Basin, China. *Atmospheric Research*, 178-179, 521-534. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.018>
- Zhou, G., Wei, X., Wu, Y., Liu, S., Huang, Y., & Yan, J., Zhang, D., Zhang, Q., Liu, J., Meng, Z., Wang, C., Chu, G., Liu, S., Tang, X., & Liu, X. (2011). Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. *Global Change Biology*, 17(12), 3736-3746. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02499.x>

