

---

## **13. ESCENARIOS FUTUROS DEL AGUA DE LA ORINOQUÍA – AÑO 2040**

La Orinoquía siempre se ha relacionado con la abundancia del agua, pero en las últimas décadas se han estado presentando algunos desafíos como: el incremento de los monocultivos, de la exploración de hidrocarburos y el cambio climático con aumentos de temperatura y olas de calor, que, sumados conjuntamente, están teniendo un gran impacto en las aguas de las llanuras del Orinoco.

Para tener un mejor panorama y poder visualizar el futuro del agua en la región, se presentan dos posibles escenarios futuros a 2040. En primer lugar, se ilustran detalles del plan PRICCO para la Orinoquía (Plan Regional Integral de Cambio Climático), en el que se contrasta la situación actual del clima y los escenarios, proyecciones y tendencias para toda la región al año 2040. En segundo lugar, y de manera más específica, se presenta una aproximación a la modelación del escenario de las aguas subterráneas del municipio de Yopal a 2040.

### **13.1 Escenarios, proyecciones y tendencias climáticas de la Orinoquía a 2040**

Con el liderazgo del CIAT (Centro Interamericano de Agricultura Tropical) y el apoyo de las CAR de la Orinoquía, Cormacarena, Corporinoquía y la empresa de petróleo Ecopetrol se hizo un plan regional completo sobre la perspectiva en el cambio del clima para esta región, en el que participaron más de 1.000 representantes decisorios de 170 establecimientos de orden público y privado. En dicho estudio se comparó el escenario de la temperatura actual con el escenario futuro a 2040 (CIAT et al., 2017).

**Escenario actual.** Como parte del modelamiento del clima actual se hizo una zonificación climática en la que se incluyeron las probabilidades de eventos extremos de sequía y de exceso hídrico severo. La región de la Orinoquía fue dividida en ocho (8) zonas así: (1) Sabana inundable 21,2 %, (2) altillanura plana 11,9 %, (3)

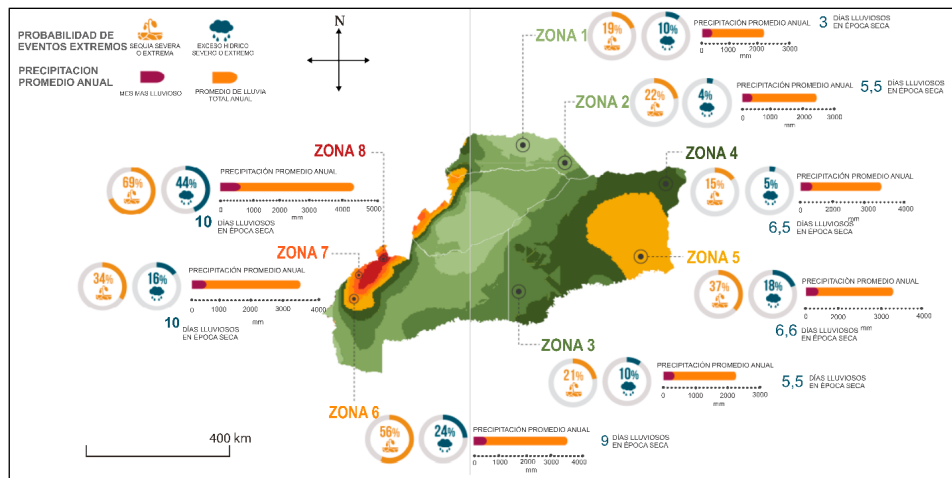
altillanura disectada 27,7 %, (4) áreas protegidas 8 %, (5) transición Orinoco-Amazonas 17,1 %, (6) transición andino-Orinoco-Amazonas 1,9 %, (7) piedemonte 7,6 % y (8) cordillera 2,6 %.

La Figura 66 muestra que bajo las condiciones climáticas actuales y de temperatura, las sabanas inundables (Zona 1, Casanare y Arauca) presentan una probabilidad de 19 % de extremos de sequía severa y un 10% de posible riesgo de exceso hídrico severo, con una precipitación promedio de 2.000 mm/año; mientras que la altillanura (zonas 2 y 3, partes de Meta y Vichada) exhibe entre 20 y 21 % de extremos de sequía severa, y un 4 a 10 % de potencial de exceso hídrico, con una precipitación de cerca de 2.500 mm/año.

La llanura inundable presenta solo tres días lluviosos en época seca, mientras que la altillanura presenta alrededor de 5,5 días lluviosos en época seca, lo que suaviza esta temporada (CIAT et al., 2017).

**Figura 66**

*Probabilidad de eventos extremos en la Orinoquía bajo las condiciones climáticas actuales*



*Nota.* El círculo amarillo corresponde al % de posibilidad que se presenten sequías, el círculo azul a las inundaciones. CIAT et al. (2017)

---

**Escenario a 2040.** La modelación de los escenarios, proyecciones y tendencias a 2040 se hicieron con cambios proyectados en dos variables: la temperatura máxima y mínima para tres trayectorias diferentes: optimista, realista y pesimista.

La Figura 67 presenta los tres escenarios de cambios o anomalías proyectadas con la temperatura máxima y los cambios proyectados en la precipitación con una trayectoria de concentración representativa (RCP), con énfasis en la RCP de 4,5. Las RCP son escenarios de la trayectoria de concentración de GEI adoptados por la oficina de cambio climático de las naciones unidas o IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, (ver Capítulo 2) para la modelación del clima.

La RCP 4,5 (realista) es una de las tres trayectorias que describen diferentes futuros climáticos, dependiendo del volumen de GEI en la atmósfera a ser irradiados en los próximos años. Un RCP de 4,5 indica la cantidad de irradiación (vatios) por metro<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>). La RCP 4.5 en particular indica que las emisiones alcanzan su punto máximo alrededor de 2040, luego disminuyen.

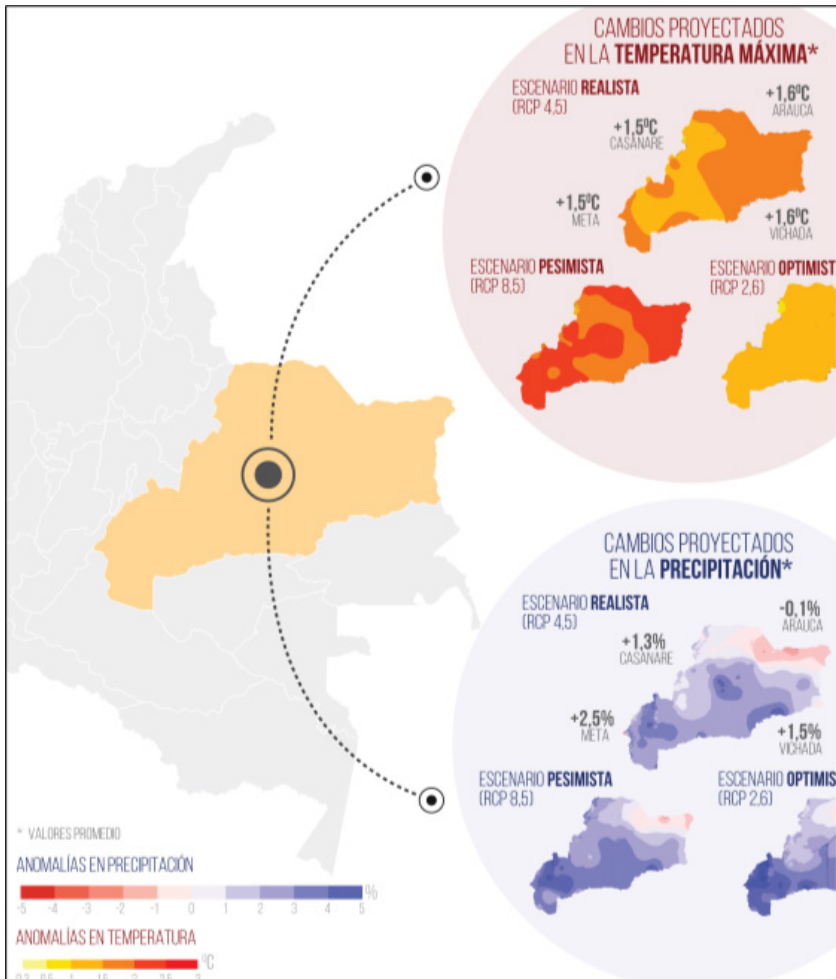
**Proyecciones.** En la Orinoquía colombiana se pronóstica que a 2040 la temperatura máxima actual se incrementa entre 0,8 a 1,9 °C y la mínima entre 0,3 a 1,8 °C. Se suponen temperaturas extremas más calientes y más frecuentes, así como, temperaturas frías menos frecuentes.

Se prevé aumentos de la probabilidad de días con temperaturas superiores a 38°C en la zona oriental, la probabilidad de días con estas temperaturas puede aumentar en más del 20%. Nótese que, bajo un escenario realista, a 2040 los incrementos para Meta y Casanare podrían alcanzar los 1,5°C, mientras que los cambios proyectados en la precipitación podrían incluso aumentar entre 1,3 y 2,5 % (Figura 67). La Temperatura de 38°C es el umbral a partir de la cual el calor es extremo y se presenta estrés calorífico que puede estar acompañado por dolores de cabeza, deshidratación,

problemas respiratorios y posibilidades de paro cardíaco, afecta de la misma manera a seres humanos y animales, pero particularmente a los niños y ancianos.

**Figura 67**

*Cambios o anomalías proyectadas con la temperatura máxima y la precipitación*



Nota. CIAT et al. (2017)

---

La Figura 67 indica que las anomalías proyectadas para la Orinoquía en las precipitaciones son ligeras, y fluctuarían entre -0,1 y 2,5 % con mayores incrementos hacia el sur de la región y decreciendo hacia el norte en la cercanía al río Arauca. Con el aumento de la temperatura, la probabilidad de sequías también crecerá, acompañada del crecimiento del número consecutivo de días sin lluvia. Los excesos de lluvia serán más frecuentes y los eventos lluviosos por encima de 90 mm.

De acuerdo con la (Figura 66) los períodos de sequía se estarían presentando cada 5 años en promedio, y podrían ser más severos y repetitivos. Dichos períodos de sequía coinciden con los de recurrencia advertidos en el norte de la región (Capítulo 4, Figura 18).

**Tendencias e impactos.** En cuanto a la biodiversidad, la mayoría de especies se verán afectadas y algunas tendrán que desplazarse a zonas más favorables que, en su mayoría, serán hacia el piedemonte y la cordillera. En cuanto al recurso hídrico, las zonas de sabanas inundables tendrán que sortear los cambios en el régimen de precipitación con épocas de lluvia y sequía más fuertes y frecuentes.

En algunos de los ríos, el aporte al caudal será positivo, pero en la mayoría, tendrá efectos negativos. En cultivos de cereales, las pérdidas en rendimiento estarán entre el 15 y el 60 %, el café se desplazará hacia zonas más altas. La ganadería tendrá mayor riesgo de pérdida por estrés calorífico. En cuanto a la salud, puede verse mayormente afectada por el aumento de la población de mosquitos transmisores de malaria, dengue, zika y Chikunguña (CIAT et al., 2017).

En lo referente al agua subterránea, se deben establecer más estaciones hidrometeorológicas de monitoreo y también adelantar más estudios, de tal manera que haya información suficiente para modelar los acuíferos y niveles, y definir contextos de planificación y decisión de hojas de ruta sobre las mejores opciones a tomar.

---

La presencia de los páramos de la Cordillera Oriental hace que la Orinoquía tenga una gran riqueza hídrica; A pesar de esa abundancia de agua, no todas las corrientes mantienen flujos constantes por todo el año debido a que la época seca es tan intensa y prolongada.

Como resultado, el acceso al agua será limitada para ciertas áreas, particularmente para los ríos que nacen en la sabana. Se hace necesario más rigurosidad en las concesiones de agua, de igual manera, el seguimiento y verificación de las condiciones de las mismas. También es urgente preservar los bosques en la cordillera y en la sabana.

### **13.2 Modelación del escenario de las aguas subterráneas de Yopal a 2040**

En el año 2011 una fuerte temporada de lluvia generó crecientes en los cauces y deslizamientos, dañó la bocatoma y la planta de procesamiento del agua para el consumo de la ciudad de Yopal.

Ante dicha catástrofe la ciudad poco a poco fue proveyéndose de agua subterránea, primero con pozos que construyeron las empresas petroleras, y luego con los adicionales construidos y mantenidos por la ciudad con apoyo del gobierno nacional.

El agua subterránea siempre se vende como la panacea para solucionar la escasez de este líquido, especialmente en ciudades con situaciones casi óptimas para este tipo de aguas como es el caso de Yopal que descansa sobre un gran abanico aluvial depositado por el río Cravo Sur y con una precipitación que sobrepasa los 2.000 mm de lluvia por año, lo que provee una buena recarga de los acuíferos (Figura 68). No obstante, ¡hay un desafío que se torna inmanejable con el tiempo, el costo!

---

**Figura 68**

*Abanico aluvial de la ciudad de Yopal y pozo de agua subterránea*



Los varios pozos subterráneos para proveer de agua a una ciudad como Yopal, requieren: construcción, mantenimiento, bombeo del agua hasta la superficie y del agua hacia la parte alta de la ciudad donde están las plantas de tratamiento, para luego dejarla caer por gravedad a los diferentes barrios de la ciudad. Los costos mencionados anteriormente son muy altos, porque la energía eléctrica en Colombia es muy costosa.

Los costos excesivos han hecho que Yopal esté considerando regresar al antiguo sistema de proveerse de agua superficial. ¿Y por qué no?, si cerca de Yopal bajan varios ríos y arroyos, provenientes de las frías montañas de la cordillera, que pueden proveer de agua a la ciudad. Mientras se da el cambio de la fuente, la ciudad seguirá utilizando las aguas subterráneas.

En los últimos años la ciudad de Yopal ha tenido una de las más grandes tasas de crecimiento poblacional no solamente en Colombia, sino también en Latinoamérica.

---

Por un lado, debido al boom económico del petróleo y la agroindustria, por el otro, con el modelo perverso empleado por los líderes políticos locales de construir urbanizaciones para ganar votantes. Lo anterior ha llevado a un crecimiento poblacional desmedido, y surgen interrogantes de cómo se sostiene el presente ritmo de incremento demográfico y de consumo de agua: ¿cómo serán las condiciones de recarga y temperatura a 2040? ¿El acuífero de Yopal tendrá capacidad para sostener una demanda superior en 20 años?

Para responder a estas preguntas se comparan las condiciones de Yopal con la modelación adelantada en la ciudad de Santa Cruz (Bolivia) bajo un escenario de cambio climático. Para cuantificar la información en zonas urbanas se utilizó el modelo propuesto por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) en 2012, así mismo, para proyectar temperatura y precipitación se utilizó el software PRECIS propuesto por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático).

De tal manera que se viera a futuro, se utilizó el Modelo Climático Global ECHAMA del Instituto de investigación Max-Planck de Alemania (Peláez y Pasig, 2018). Se trata de integrar tres aspectos actuales como: agua, cambio climático y escenarios futuros. En la actualidad, la ciudad de Yopal tiene 170.000 habitantes con un consumo aproximado de 150 litros/habitante/día con una cobertura del 90 % y que depende en un 100 % de agua subterránea. La cantidad de recarga en el acuífero está condicionada por la infiltración profunda, y esta depende del tipo de cobertera de la superficie.

En el año 2012, la Oficina Ambiental de Estados Unidos (EPA), examinó la infiltración de aguas pluviales desde diferentes densidades de superficie impermeable, proponiendo un modelo de influencia de la urbanización en el ciclo hidrológico, el cual será aplicado en el presente trabajo como herramienta de evaluación para estimación de la infiltración de recarga al acuífero.



La ciudad de Yopal se encuentra cubierta por las gravas del abanico aluvial depositado por el río Cravo Sur, sobre el que se ha construido la ciudad, lo que facilita la infiltración para la recarga del acuífero y al mismo tiempo permite el paso de contaminantes; por lo tanto, corresponde efectuar medidas de protección de recurso hídrico.

Los actuales 170.000 habitantes de la ciudad a 2020, para 2040 se proyectan en 267.000, los que a futuro demandarán mayor cantidad de agua, especialmente agua potable. En la actualidad, el consumo de Yopal es de 260 litros/segundo, con el incremento poblacional del 2,3 %, a 2040, el consumo podría alcanzar los 410 litros/segundo (Tabla 6).

**Tabla 6**

*Proyección del aumento del consumo de agua subterránea en Yopal 2020 a 2040*

<b>Año</b>	<b>Población</b>	<b>Consumo de agua (litros/segundo)</b>
2020	170.000	260
2025	190.470	291
2030	213.405	326
2035	239.102	365
2040	267.893	410

En todo municipio se proveen pérdidas físicas que corresponden al deterioro de la infraestructura (fisuras, roturas y filtraciones) de las redes de agua potable que pueden constituir en aporte indirecto a la recarga del acuífero. Para la ciudad capital se proyecta un desarrollo económico local altamente heterogéneo y un incremento de industria con poca implementación de medidas ecológicas y sostenibles, lo que sugiere un aumento de los GEI que generan el cambio climático.

Para la proyección de precipitación y temperatura se analizó datos obtenidos del servicio nacional de meteorología e hidrología, desde 1990 a 2015 en 60 estaciones meteorológicas que están distribuidas en Yopal y sus alrededores, los resultados fueron los siguientes:

---

**1) Variaciones de temperatura.** Hacia futuro se identificó un incremento de temperatura entre 0,5 °C a 2 °C dependiendo de las características de cada lugar respectivamente. Para proyecciones a 2040 se calculó con el sistema de modelamiento global ECHAM4 del Instituto Max-Planck de Alemania y para la diferencia de cambios de temperatura se utilizó sistema climático territorial PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) aplicando datos de WordClim.

Como resultado, se identificaron los cambios de temperatura en época de húmeda (abril a diciembre) aumentará entre 0,96 °C y 1,93 °C y época seca (diciembre a marzo) se evidencia un mayor aumento de temperatura entre 1,10 °C y 1,84 °C.

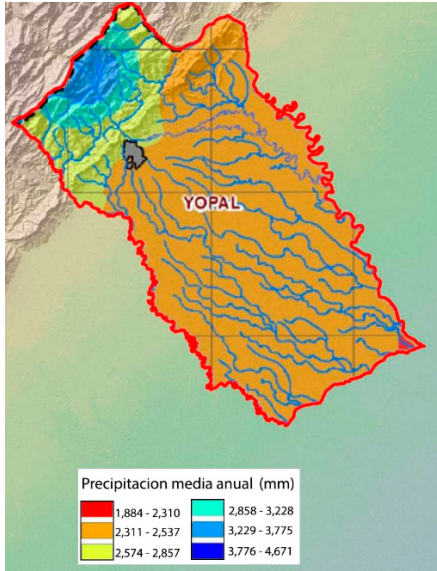
También se tuvo en cuenta las variaciones de temperatura y precipitación a 2040 planteadas por el CIAT donde los cambios de temperatura son de +1,5 °C, mientras que los cambios de precipitación son mínimos, pero con sequías más frecuentes al igual que los eventos lluviosos (CIAT et al., 2017).

**2) Variaciones de precipitación.** Se estima que, en la época seca, que va de diciembre a marzo, se tendrá un descenso en la precipitación; y en la época húmeda (noviembre a marzo), habrá un incremento de la misma. Los datos históricos de estaciones meteorológicas utilizadas fueron ajustados con el modelo climático regional PRECIS.

Los cambios más radicales se prevén hacia la zona de la sabana, donde la precipitación en época seca (diciembre a marzo) al 2040 disminuirá 15%, y en época húmeda (noviembre a marzo) incrementará al +10 % (Peláez y Pasig, 2018). A pesar de los cambios estacionales, parece que los valores netos de precipitación cercanos a los 2500 mm/año en la ciudad de Yopal se mantendrán sin mayores cambios (Figura 69).

**Figura 69**

*Precipitación media anual en Yopal*



Nota. SGC (2018)

### **3) Superficies de infiltración en el área de recarga de los acuíferos.**

Un porcentaje del agua que entra en contacto con el suelo se evapora nuevamente a la atmósfera, el otro se desplaza sobre la superficie dependiendo de la cobertura, y otro se infiltra en el subsuelo. El Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en 2012, identificó cuatro escenarios a futuro con distintas características de escurrimiento, evapotranspiración, infiltración profunda e infiltración superficial (Peláez y Pasig, 2018), así:

- Cobertura vegetal: no existe influencia humana, ni cobertura impermeable.
- Superficie impermeable de 10–20%: poca presencia humana, 1 casa por 0,40 ha.
- Superficie impermeable de 35-50%: presencia humana, 4 casas por 0,04 ha.

- 
- Superficie impermeable de 75-100%: urbanizado, 8 casas por 0,04 ha.

De los estudios del MIT se concluye que a menor cobertura vegetal y mayor impermeabilización del suelo por las construcciones y carreteras, la infiltración del agua o recarga de los acuíferos de los que se provee el agua de la ciudad disminuye.

**4) Volumen de infiltración.** Una vez calculado los componentes hidrológicos para la superficie periférica (rural) y superficie metropolitana (urbana), se estima el volumen de infiltración superficial y profunda, el cual será el aporte de recarga al acuífero (Tabla 7).

En la superficie periférica (rural) se prevé que la infiltración superficial y profunda disminuirá hasta 2040 como resultado de la baja extensión por hectáreas y el cambio de uso de suelo que será afectado por la impermeabilización producto de las construcciones con poca o nula zona verde.

Sumando los valores de infiltración profunda en la superficie periférica (rural) y metropolitana (urbana) se tiene como resultado una baja en el volumen total de infiltración profunda a consecuencia del cambio del uso de la cobertera y del suelo afectando la recarga del acuífero.

**5) Balance hídrico estimado de agua subterránea.** En la Tabla 7, se calculan las entradas y salidas de agua. Las entradas corresponden a la precipitación, las salidas a la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración; en este caso hay que considerar las pérdidas de la red (que se incrementan con el tiempo) y el bombeo de los pozos.

Para el caso de Yopal el agua subterránea disponible anualmente debe ser igual a la infiltración por el área del municipio (urbana + rural adyacente o periférica); es decir que, si el bombeo excede a la recarga, bajan los niveles de los acuíferos y se puede producir subsidencia.

---

**Tabla 7**

*Balace hídrico de agua subterránea en Yopal en milímetros/año*

Precipitación (mm/año)	2500
Evapotranspiración (mm/año)	1736
Escorrentía (mm/año)	564
Infiltración (mm/año)	200
Pérdidas de la red (mm/año)	20 %

*Nota.* SGC (2018)

Como resultado del balance se estima que la recarga del acuífero no disminuirá por la disminución de la precipitación, sino por la disminución de la infiltración debido al aumento de las construcciones y la infraestructura; la cual podría ser del 25 %, que es consecuencia a su vez, de la baja de la infiltración de la precipitación en el escenario de cambio climático.

Por otro lado, habrá un incremento de aportes de los ductos de agua potable (por fugas) y del sistema de alcantarillado. Así también, habrá un incremento de explotación del recurso hídrico subterráneo para consumo humano.

**Conclusiones.** De acuerdo con el aumento poblacional y la velocidad de expansión de la superficie construida, se espera que la superficie urbana de Yopal crezca en más del 50% en el 2040. La disminución de la recarga se deberá no tanto al decrecimiento de la precipitación, sino al aumento de la cobertura por infraestructura y la consecuente impermeabilización de la misma.

---

Con el incremento del número de habitantes se espera un alza en los requerimientos de agua y, por lo tanto, en la utilización de los acuíferos del subsuelo con un posible descenso de la saturación de los pozos de agua.

El descenso de la recarga también se verá perjudicada por el cambio en la temporalidad de la distribución de la precipitación y temperatura que inciden en la escorrentía que está relacionada con el cambio del uso del suelo; lo que significa que, si las condiciones actuales se mantienen, los bosques disminuirán hacia la parte elevada de la cuenca del río Cravo Sur (ver numeral 7.2).

A pesar de los desafíos, los cálculos indican que a 2040 el acuífero de Yopal aún podría proveer de agua al número de habitantes que se esperan para entonces, debido a la buena recarga directa por infiltración y a la infiltración proveniente del río; en últimas, los requerimientos de agua dependerán de las transformaciones socioeconómicas y de la infraestructura de los sistemas hidráulicos.