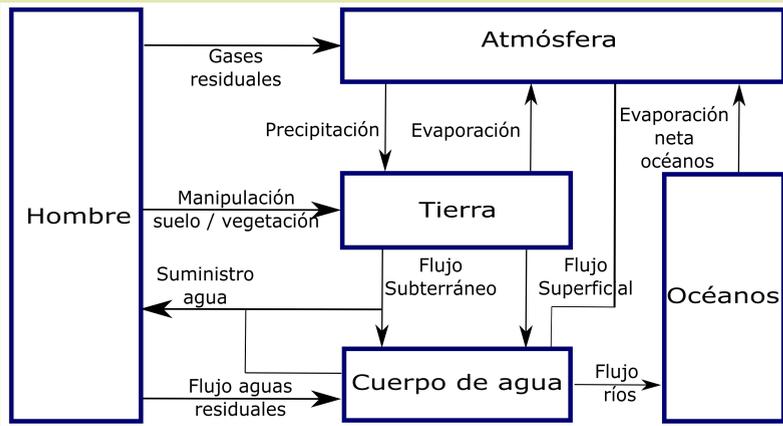


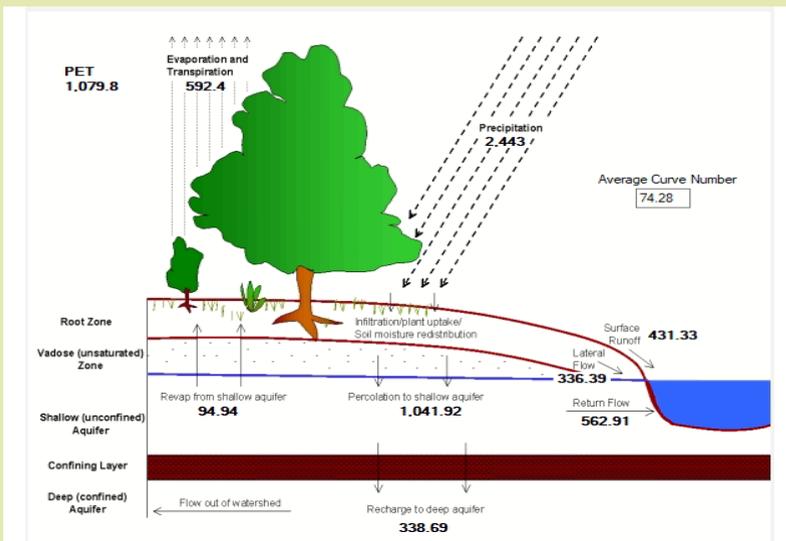
Modelación hidrológica río Cesar y ciénaga de Zapatosa

Cañón-Hernández, J., Hernández-Castillo, B. E., Díaz-Barrios, M. C., Fuentes-Cabrejo, C. A., Barros-Vanegas, M.

Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH), componente 2 – Gestión de la Salud de los Ecosistemas; Proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive; Fundación Natura, carrera 21 # 39 – 43, Bogotá D. C., Colombia.

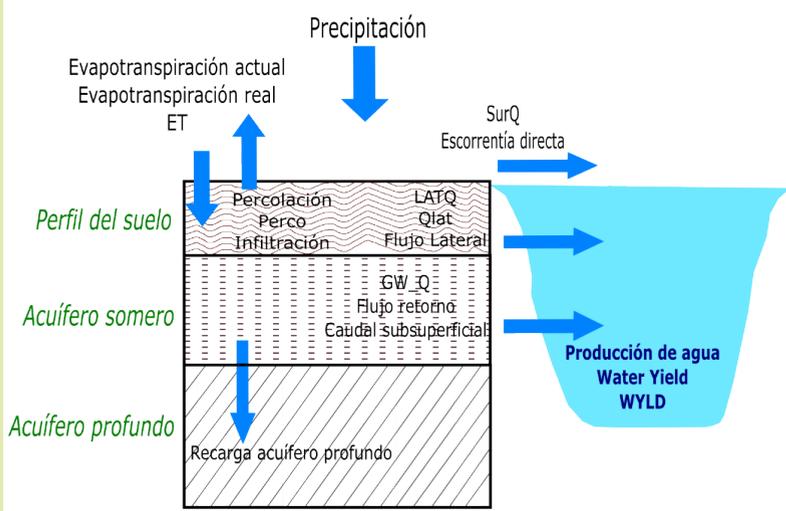


La construcción de los modelos hidrológicos inicia con la comprensión y la dinámica del ciclo del agua. El hombre es un factor importante que afecta este ciclo, ya que extrae y manipula las aguas subterráneas y superficiales. La escala temporal usada para la modelación hidrológica abarca meses y años, así como la oferta hídrica y el cambio climático, entre otros temas.



Para la cuenca del río Cesar, la precipitación anual promedio multianual es de 1439,4 mm, de los cuales, se evapotranspiran 1082,7 mm, este último calculado con el método de Hargreaves. De los restantes, 356 mm queda el agua a dividir entre otros procesos hidrológicos como caudal lateral, escorrentía directa, flujo subsuperficial y las pérdidas.

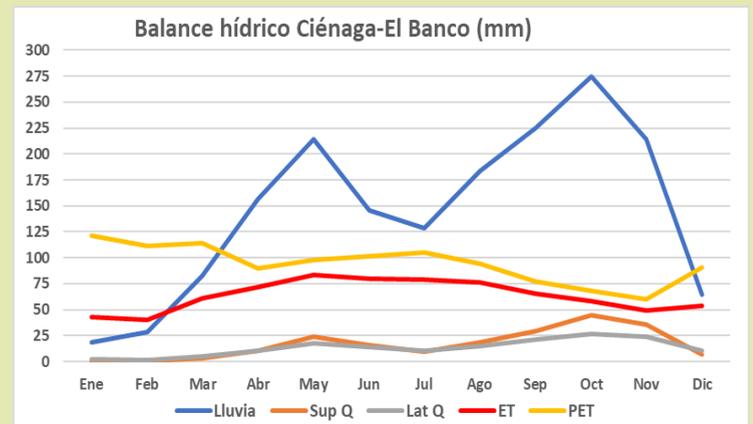
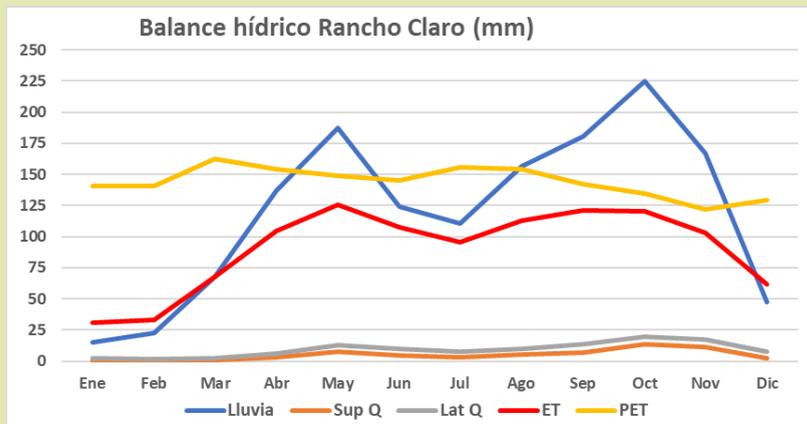
Balance Hídrico SWAT



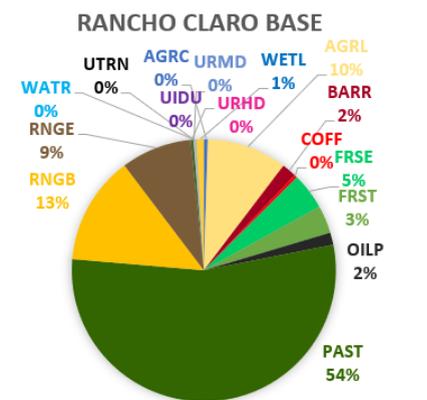
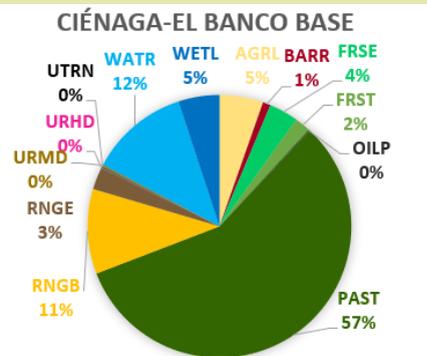
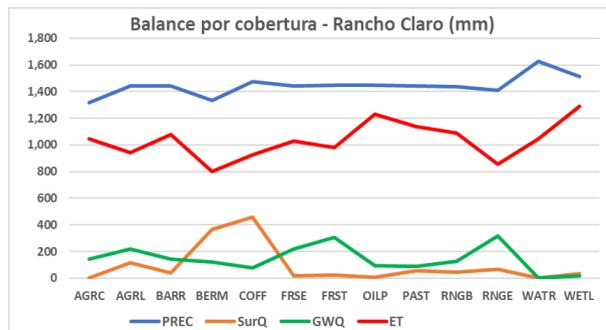
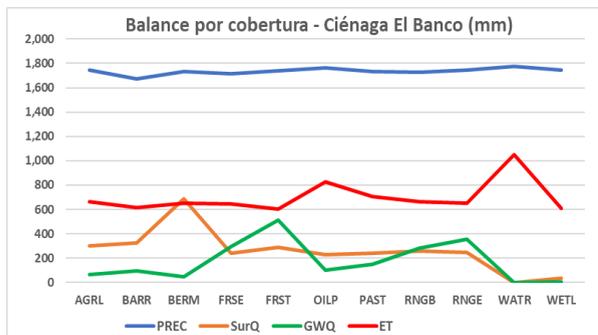
La relación entre precipitación y la **escorrentía es del 4.0%**. La **relación entre el agua superficial y agua subterránea, de 40%**; indicando que, desde la lluvia, **el 75% transpira**, quedando un **25%**, del cual se aborda el concepto de **producción de agua**.

Producción de agua = caudal superficial + caudal subsuperficial + caudal lateral – pérdidas.

Se generaron dos modelos del balance hídrico en la cuenca del río Cesar: Rancho Claro y Ciénaga El Banco exclusivamente en su periodo histórico, base o de recopilación de información disponible que fue de 1987-2018. La manera de presentar los resultados es espacial mostrando la distribución por subcuenca de las variables hidrológicas, en otros casos son hidrogramas (series de tiempo) con el valor de la variable en las ordenadas y la variable tiempo en las abscisas.

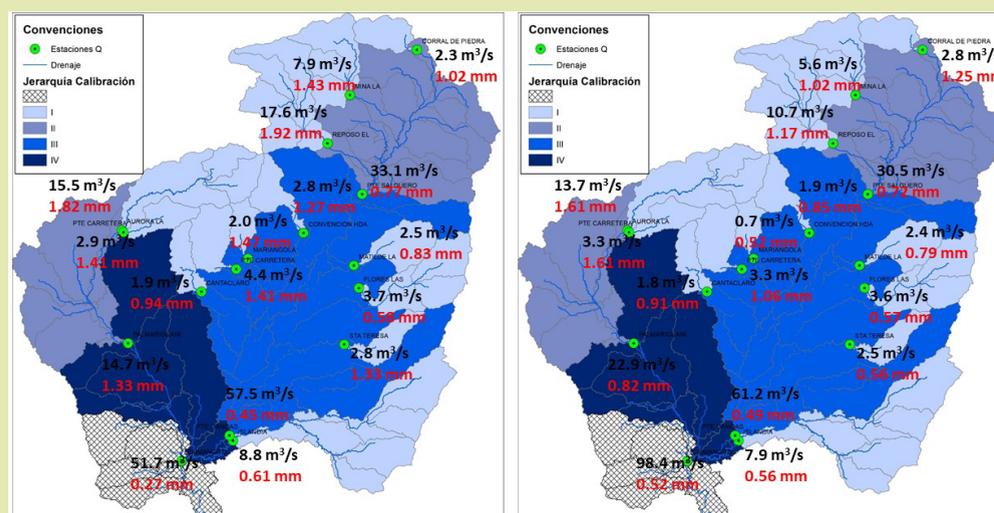


El comportamiento a nivel intra-anual del balance hídrico en los dos modelos del río Cesar: Rancho Claro y Ciénaga-El Banco, el cual es bimodal, con dos períodos de niveles máximos y dos de niveles mínimos.



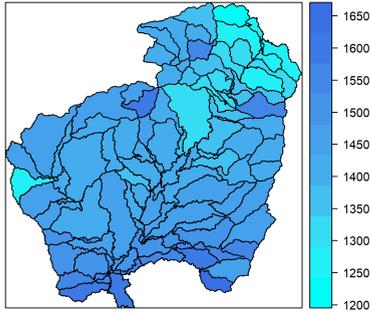
Se presentan los valores de los principales componentes según las coberturas de los modelos. El primer caso es un promedio de toda la cuenca, y el segundo, un promedio de todos los lugares donde se presenta esa cobertura. Así, el desempeño se ajusta al comportamiento bimodal de la precipitación. En coberturas de tipo bosque contribuyen a la infiltración, reducen escorrentía, entre otras.

Modelo Rancho Claro



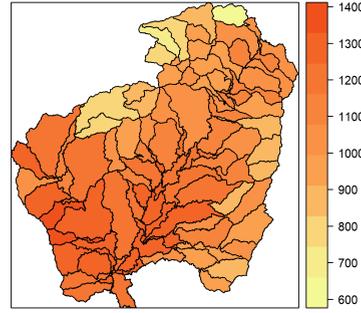
En la zona izquierda se indican los valores históricos a partir de estaciones hidrométricas, en los cuales los negros son el caudal medio diario y los rojos, el rendimiento hídrico. En términos generales, los valores entre observados y simulados son muy similares, con excepción de la estación Caimancito, la cual, desde los datos históricos, muestra una reducción de rendimiento del 50%, con respecto a la antecesora Pte. Canoas.

PRECIPmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



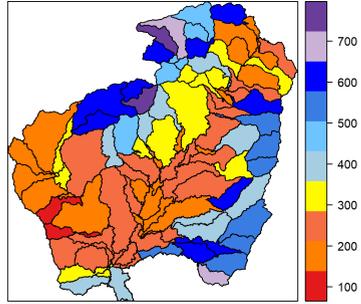
Precipitación

ETmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



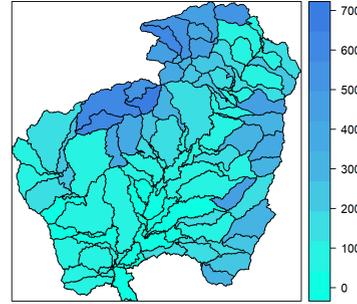
Evapotranspiración

ESC_OHTS Modelo RanchoClaro Escenario Base



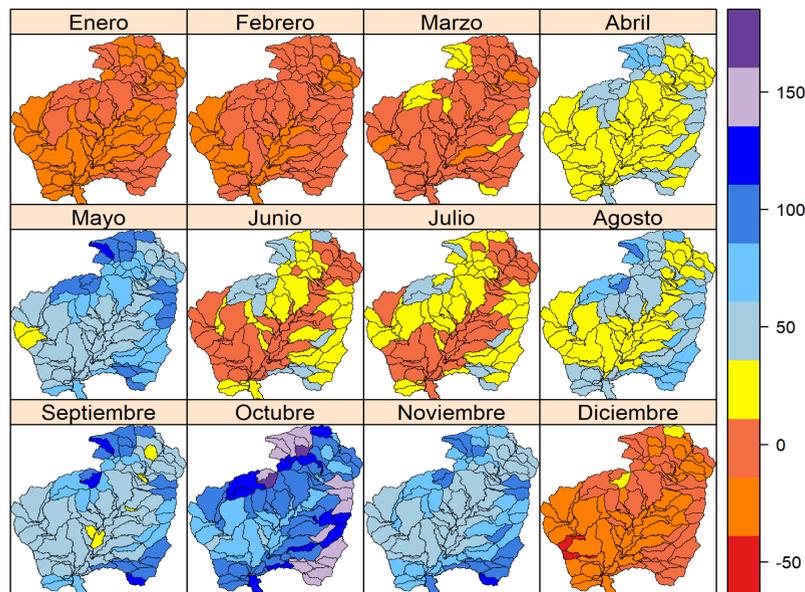
Oferta hídrica total superficial

WYLDmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



Producción de agua

Oferta hídrica TS (mm) RanchoClaro Escenario Base

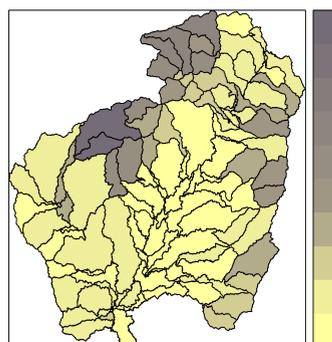


Se evidencia que en la zona sur del modelo Rancho Claro es mayor la precipitación anual, la cual varía entre 1200 y casi 1700mm al año. En el caso de la evapotranspiración actual, los sitios con mayor valor son la cuenca baja del río Ariguaní y la parte central del valle del río Cesar.

La Oferta Hídrica Total Superficial OHTS, en términos de lámina de agua (mm), se asemeja a un concepto propio de SWAT denominado producción de agua, que en esta herramienta corresponde a la sumatoria de la escorrentía superficial, caudal lateral y caudal subsuperficial restándole las pérdidas. Ambas variables tienen una variación entre cero y un poco más de 700mm, siendo mayor en OHTS.

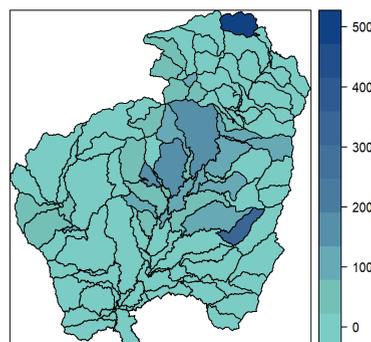
Mediante el promedio mensual multianual se observan menores valores en los meses cuando menos llueve, en el régimen bimodal de las lluvias.

Qlatmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



Caudal lateral

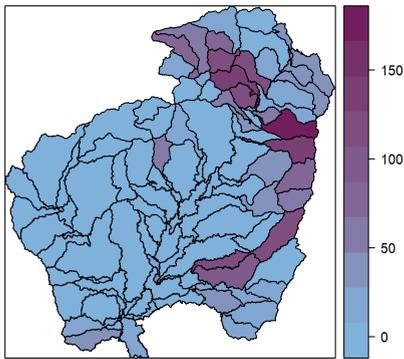
SURQmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



Escorrentía superficial

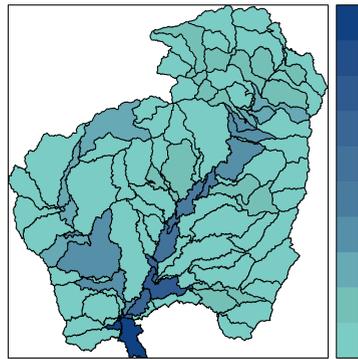
Se observa que para la producción del agua el comportamiento del caudal lateral hace que se presenten zonas de pendientes altas en el río Ariguanicito y Ariguaní, junto a la zona alta del río Guatapurí. Para el caso de la escorrentía directa de la cuenca del río Cesar, su aporte es alto, al igual que en la zona de la estación de Puente Carretera, sobre el río Diluvio, en jurisdicción del municipio de Valledupar.

GW_Qmm Modelo RanchoClaro Escenario Base



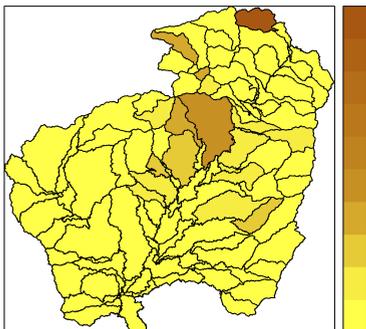
Caudal subsuperficial

Q_m3_s Modelo RanchoClaro Escenario Base



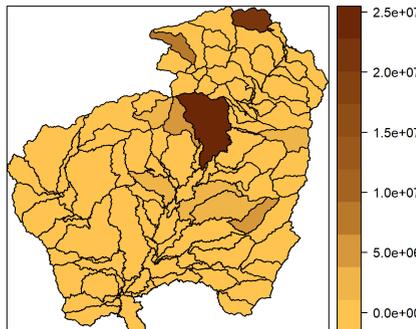
Caudal por subcuenca

SYLDt_ha Modelo RanchoClaro Escenario Base



Producción de sedimentos

Sed_tn Modelo RanchoClaro Escenario Base

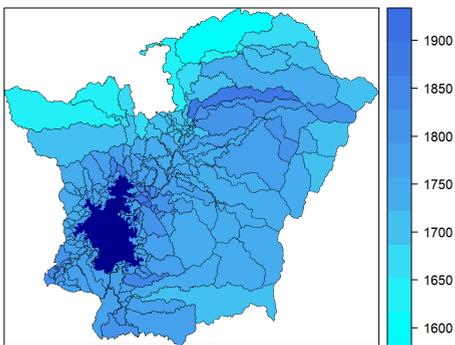


Carga de sedimentos

El caudal subsuperficial se comporta con valores altos en la parte del río Guatapurí y zonas altas de la margen izquierda del río Cesar, hacia la serranía del Perijá, en los municipios de Agustín Codazzi. La respuesta de todos los elementos, vistos como lámina, sería la acumulación de los flujos como se evidencia a través del río Cesar, alcanzando en promedio un poco más de 80 m³/s.

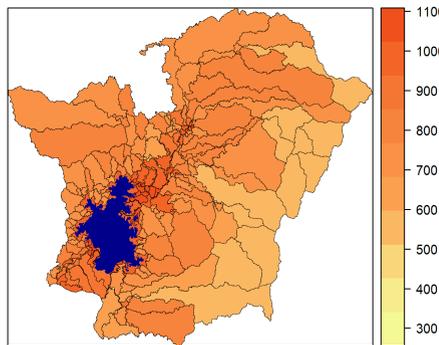
En el caso de la producción de sedimentos, esta tasa alcanza los 1.200 T/Ha, como el área aferente de la estación Corral de Piedra y de las subcuencas en la zona occidental del municipio de Valledupar, la carga de sedimentos alcanza los 25.000 kT, particularmente en las estaciones de alta producción.

PRECIPmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Precipitación

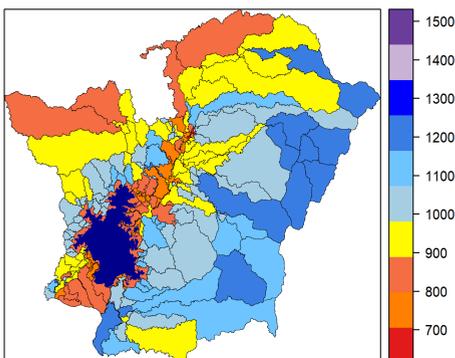
ETmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Evapotranspiración

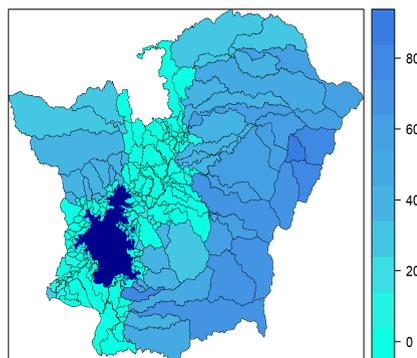
El modelo Ciénaga-El Banco muestra una precipitación media anual entre 1600 y 1900 mm, siendo mayor hacia la parte baja de la cuenca. En el caso de la evapotranspiración, esta variable se hace mayor en las subcuencas del complejo cenagoso de Zapatoza, donde se alcanzan 1.100 mm anuales.

ESC_OHTS Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Oferta Hídrica Total Superficial

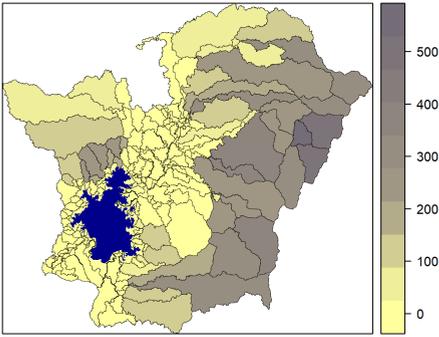
WYLDmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Producción del agua

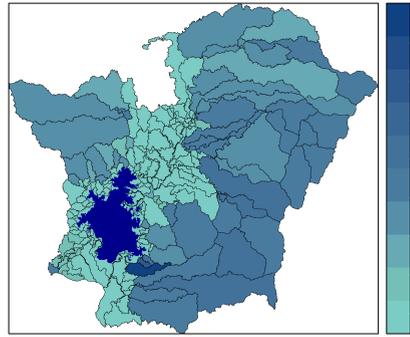
Los menores valores de oferta hídrica total superficial (OHTS) y de producción de agua se hacen menores en la zona del complejo cenagoso, a raíz de las altas evapotranspiraciones en la zona del espejo de agua.

Qlatmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Caudal lateral

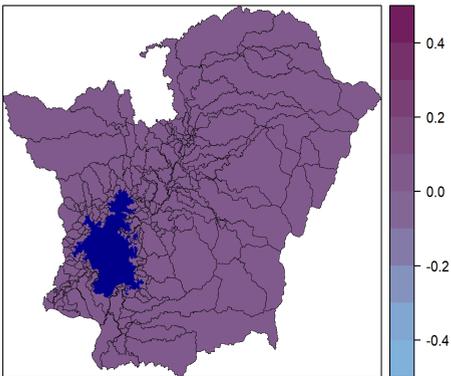
SURQmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Escoorrentía

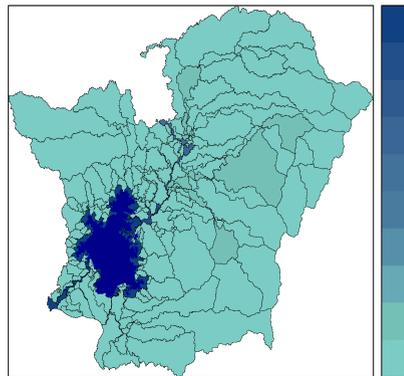
Las pendientes altas del modelo Ciénaga-El Banco se ubican en la margen izquierda de la ciénaga de Zapatosa. En el caso del flujo lateral hay mayores aportes en los municipios de Becerril, Agustín Codazzi, Curumaní y La Jagua de Ibirico. En las zonas "altas" de las dos márgenes de la Ciénaga de Zapatosa es donde mayor aporte de escoorrentía se genera, con aportes que van desde el 100 a 800 mm.

GW_Qmm Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Caudal subsuperficial

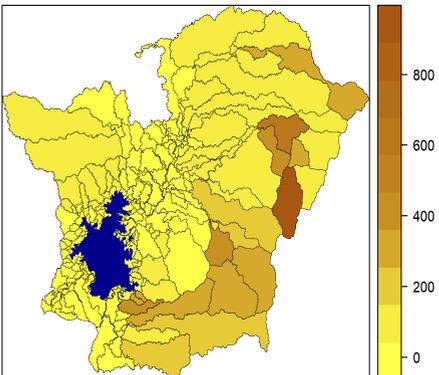
Q_m3_s Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Caudal en la corriente

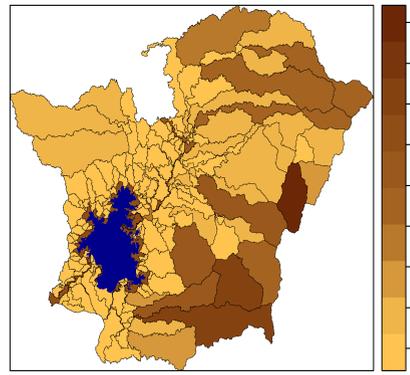
El flujo subsuperficial en la mayor parte del territorio es mínimo, casi cero, debido a que el agua percolada no regresa a buscar el cauce. En cambio, se dirige al acuífero profundo. El caudal (m3/s) es mayor sobre el río Cesar, en comparación con las demás corrientes.

SYLDt_ha Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



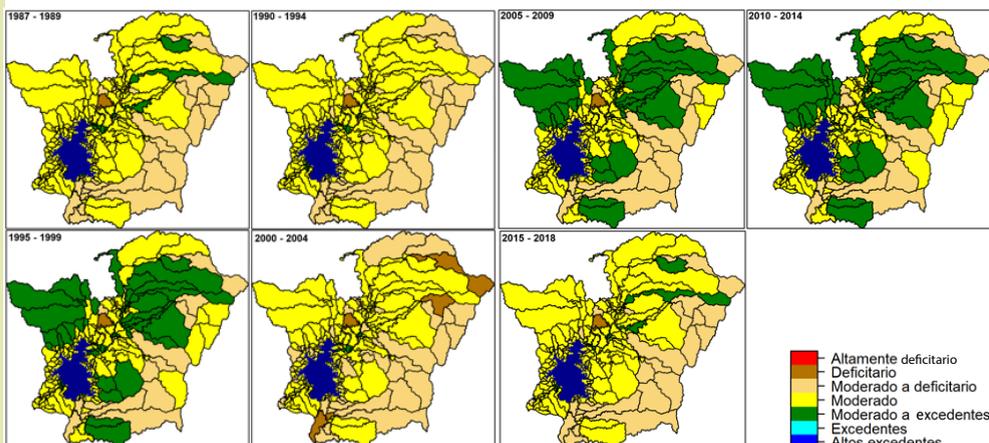
Producción de sedimentos

Sed_ktn Modelo CiénagaElBanco Escenario Base



Carga de sedimentos

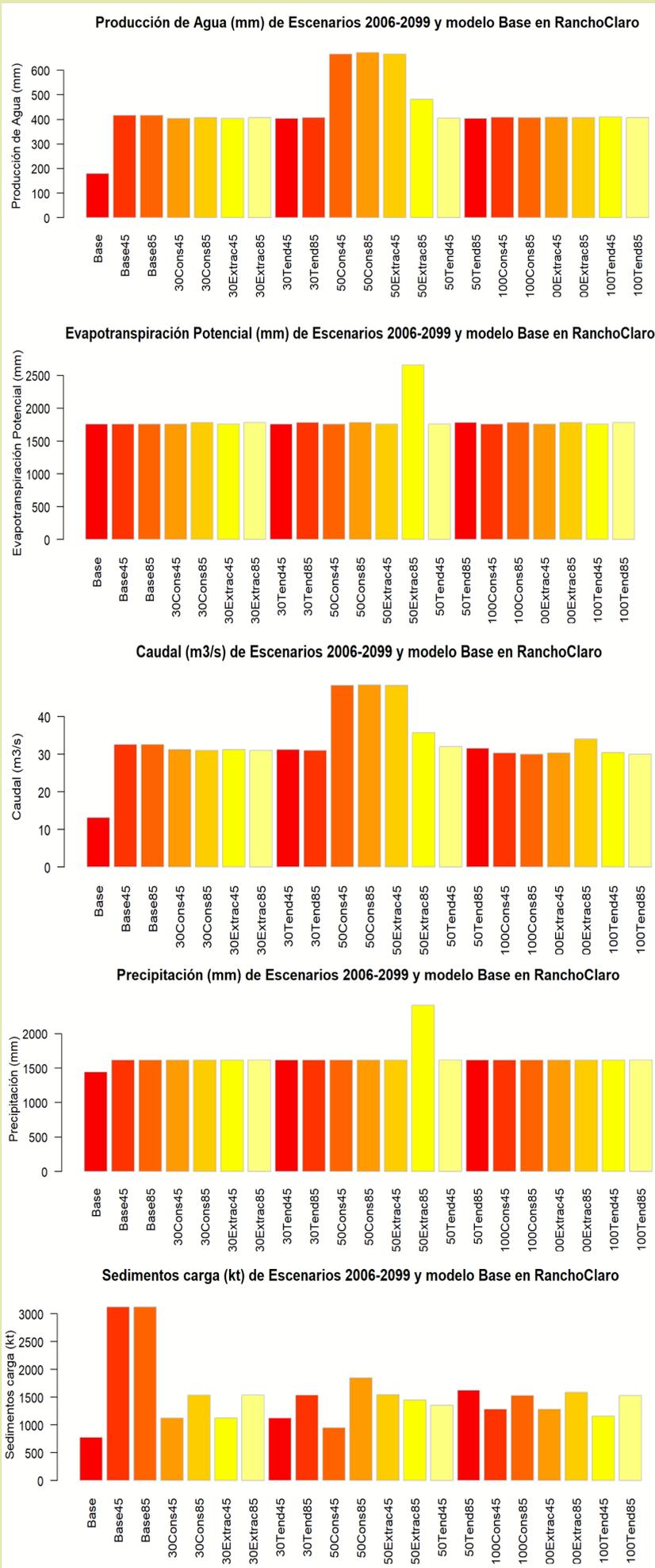
La carga y producción de sedimentos es mayor en las subcuencas de la zona de Tamalameque y Pailitas que drenan a la margen izquierda de la Zapatosa por arroyo Hondo, Animito y Quebradientes.



El índice de Aridez de Ciénaga-El Banco con tramos de 1987-1999, 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, 2010-2014 y 2015-2018 muestra que esta cuenca no se han presentado niveles de déficit de agua. Hay un déficit moderado en periodos climatológicamente secos como el de 1991. En periodos húmedos, el nivel llega de moderado a excedentes en momentos de altas lluvias como la del año 2010.

Resultados escenarios - Rancho Claro

Las simulaciones de proyecciones futuras son de aproximadamente 94 años (2006-2100s). Se decide crear tres periodos de análisis : **periodo del 30 (2019-2039)**, **periodo del 50 (2040-2069)** y **periodo del 100 (2070-2100)**. Con estos periodos se evita que los resultados de 94 años atenúen algún periodo alto o de valores altos. Además, cuanto más al futuro se simulen o generen datos, la incertidumbre aumenta, y quizás, pueda alterar los valores de las proyecciones más cercanas a la fecha actual o a los años cercanos de la década del 2020-2029.



Para todos los periodos, la producción de agua es ampliamente superior al modelo base, llegando a ser el doble en la mayoría de los escenarios y muy superior en **50Cons45**. En el periodo 2019-2039 se evidencia la diferencia entre escenarios **4.5** y **8.5**, ya que la precipitación es superior para el **RCP 8.5**.

La evapotranspiración potencial es estable en la mayoría de los escenarios, con excepción del escenario **50Extrac85**, y muy baja en el **50Cons45**. También los valores lucen constantes entre los diferentes periodos analizados.

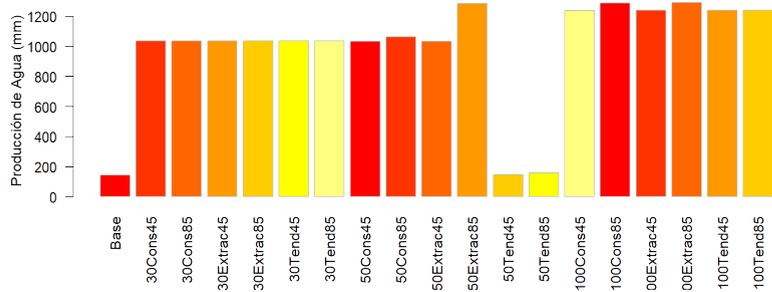
Para el caudal superficial se observan valores superiores de todos los escenarios futuros, frente al modelo base o histórico. Evaluando solo escenarios futuros en el periodo de 2019 a 2039 se evidencian las diferencias entre **RCP 4.5** y **RCP 8.5**. Los modelos **50Cons** y **50Extrac** presentan mayores caudales medios.

La precipitación es uno de los principales motores del ciclo hidrológico. En primera instancia, se observa que la lluvia en el último periodo, 2070-2098, presenta diferencias marcadas entre **los RCP 4.5** y **8.5**, situación que no es similar en los otros tres periodos. Ahora bien, en términos generales, la precipitación es superior un **15%** al periodo histórico.

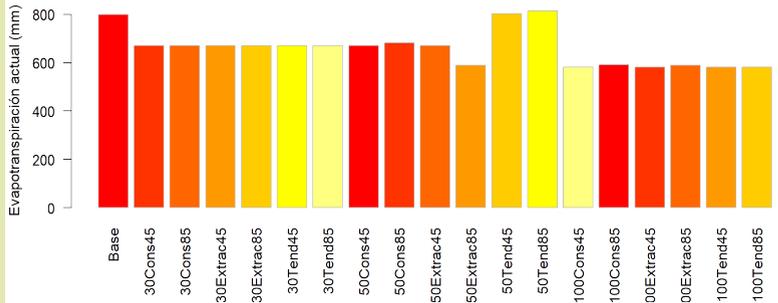
Iniciando con los valores de la carga de sedimentos en el periodo 2070-2098, son más variables entre escenarios futuros y con valores un poco menores para los escenarios **50tend45** y, a su vez, muy superiores frente al valor de **1000 kt** del modelo base. Los modelos con series de precipitación y temperatura de **RCP 8.5** tienen mayor carga de sedimentos.

Resultados escenarios – Ciénaga El Banco

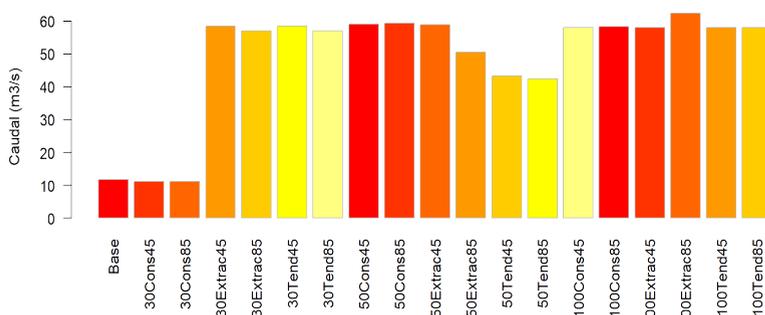
Producción de Agua (mm) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



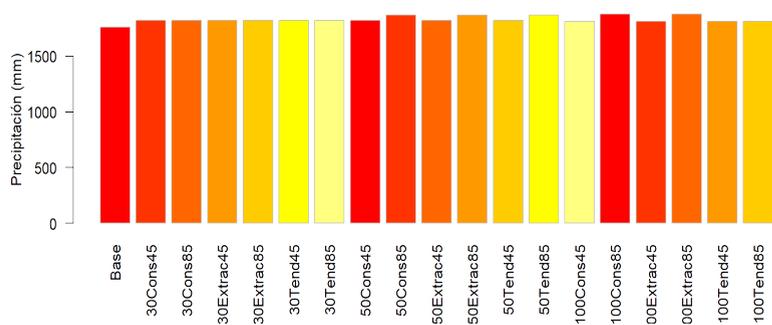
Evapotranspiración actual (mm) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



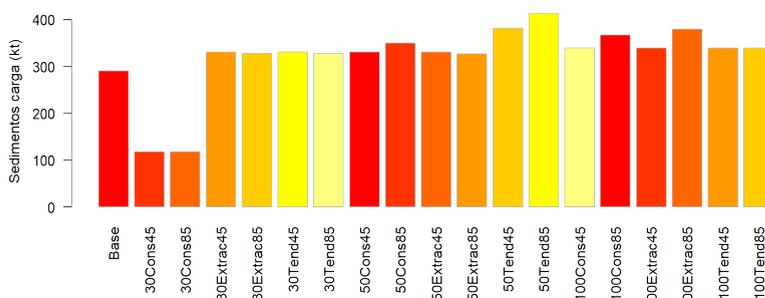
Caudal (m3/s) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



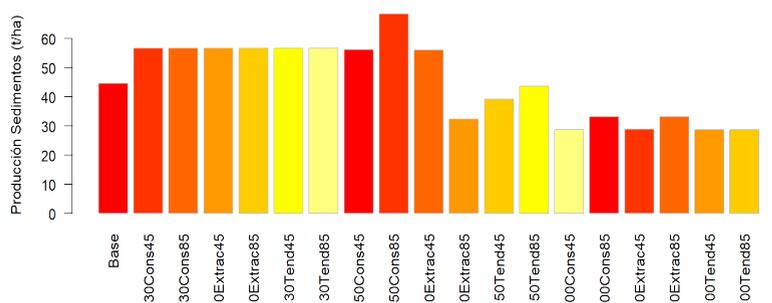
Precipitación (mm) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



Sedimentos carga (kt) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



Producción Sedimentos (t/ha) de Escenarios 2006-2098 y modelo Base en CiénagaElBanco



La producción de agua del modelo base, menor a 200 mm, se asemeja un poco a la del escenario **50tend45** y es un poco menor a la del escenario **50tend85**. Todos los otros escenarios son iguales o superiores a 1000 mm y alcanzan 1200 mm. Los valores entre los cuatro periodos no presentan cambios evidentes.

La evapotranspiración real o actual (mm) en el modelo base registra cerca de 800 mm y los modelos **50tend45** y **50tend85** presentan valores similares. Los valores menores de evapotranspiración actual se presentan en los modelos con cobertura del año 2100.

Los caudales superficiales en m3/s presentan un comportamiento similar en sus magnitudes para los escenarios base, **30conser45** y **30conser85**. En contraste, todos los otros modelos son superiores en cinco o seis veces los anteriores tres modelos. Otro punto a señalar es que en los dos modelos **50tend45** y **50tend85** se presenta un poco menos de caudal, alcanzando 40 m3/s.

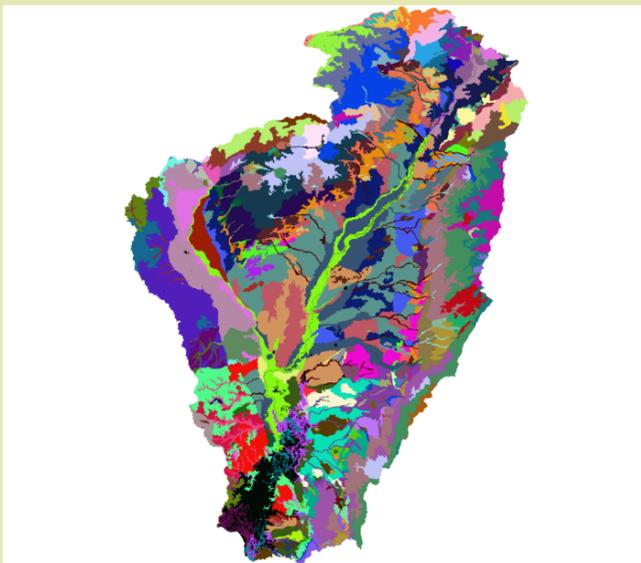
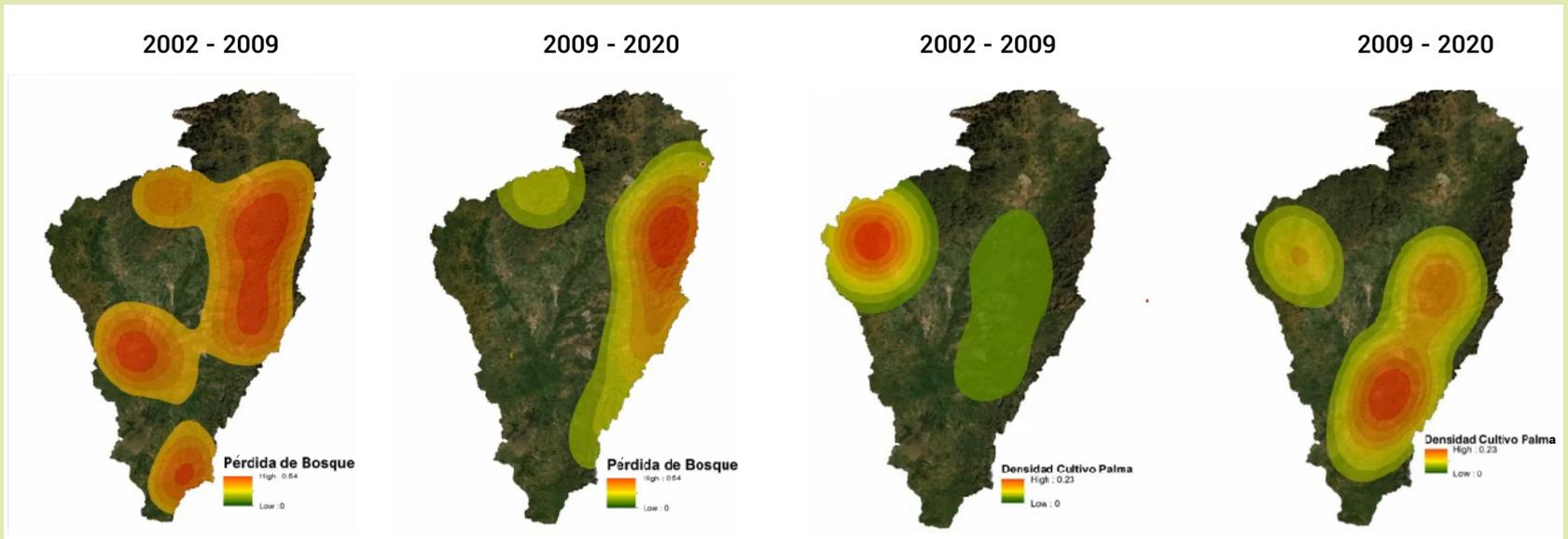
La precipitación de todos los escenarios es muy pareja, solo un poco mayor a la del modelo base que se aproxima a 1750 mm. En algunos modelos de **RCP 8.5** se presenta un poco más de precipitación, frente a su contraparte **RCP 4.5**.

La carga de sedimentos (kT) entre los cuatro periodos es muy similar, pero sí hay diferencias entre escenarios en un mismo periodo. Por ejemplo, los modelos **30cons45** y **30cons85** presentan una tercera parte de la carga de sedimentos del modelo base.

La producción de sedimentos presenta valores diferentes tanto entre escenarios como en los periodos. Iniciando por el periodo entre 2006-2098, donde el modelo base con 40 t/ha es menor que nueve escenarios y, a su vez, mayor a los otros nueve.

Escenarios futuros: cobertura y suelos

Se elaboró un modelo que permitió determinar el cambio que puede tener el uso y las coberturas del suelo como insumo en el modelamiento hidrológico.



En el 2009 – 2020, zona derecha, hubo una mayor pérdida de bosque en la cuenca del Cesar.

Con respecto al periodo 2002 – 2009, hubo un cambio significativo en la cobertura de la densidad de los cultivos de palma, los cuales se desplazaron hacia la parte baja de la cuenca y hasta el período 2009 – 2020.

También se hizo proyección del uso de la cobertura del suelo en los centros poblados, teniendo en cuenta las restricciones de las áreas protegidas, los resguardos indígenas, la incidencia de los proyectos y la extracción minera en la zona.

Para la cuenca del Cesar, con los escenarios tendenciales, el aumento de la frontera agropecuaria se presenta de manera gradual: las actividades de ganadería bajan y el presupuesto de desarrollo en la cobertura de pastos limpios y cultivos agroindustriales (palma) es el que presenta un mayor incremento. La cobertura boscosa presenta una pérdida considerable, comparable con las tasas de cambio de la cobertura de pastos limpios y palma. Con los escenarios conservativos se aplican instrumentos de conservación y preservación de la cobertura natural, principalmente con el fin de reducir las tasas de deforestación en un 20%. La pérdida de bosque y bosque de galería fue del 0,45 y 0,43%, respectivamente.

El caudal superficial o escorrentía muestra un comportamiento de reducción en los años venideros (2019 – 2039), alcanzando 20 al 40% menos.

En el periodo 2070 – 2098, la escorrentía varía en ambos sentidos, porque algunos escenarios muestran un incremento y otros, una reducción. La mayoría de los escenarios de aumento se deben al escenario de cambio climático RCP 8.5.

Agradecimientos

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam); al equipo del Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH) del componente 2: Gestión y Salud de los Ecosistemas.