
5. LA CONEXIÓN ENTRE LA ORINOQUÍA Y LA CORDILLERA ORIENTAL – ORIGEN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS A PARTIR DE ISÓTOPOS

Entre la Cordillera Oriental y las sabanas de la Orinoquía hay una dependencia directa y un engranaje hídrico porque muchos de los caños y arroyos de esta región nacen en el costado este de esta cordillera y a medida que descienden aumentan su volumen, para finalmente humedecer las sabanas. Por esta razón, se adelantó esta investigación para demostrar esa conexión entre aguas a partir de isótopos trazadores presentes en el agua.

Especialmente en el área central de la Orinoquía colombiana, se sospecha de un vínculo hidráulico entre los regímenes de la parte alta (piedemonte y páramos) con los regímenes de la parte baja (llanura proximal y llanura de inundación) (Betancur, 2008). Uno de los objetivos de este estudio es establecer dicha conexión utilizando los mejores trazadores tal como son los isótopos de deuterio, oxígeno-18 y tritio. Si los valores resultantes son similares, se relaciona los regímenes de la parte baja son alimentados por agua subterránea suministrada por la lluvia y los ríos de la parte alta incluyendo los páramos.

No obstante, si los valores son muy disímiles, se puede relacionar que la recarga principal de los acuíferos de la parte baja está principalmente dada por precipitación (infiltración vertical local) que debe estar menos empobrecida isotópicamente que la parte alta. Desde el punto de vista del tritio, si las aguas no contienen este elemento, significa que son aguas relativamente viejas, de más de 50 años, previas a la era atómica, seguramente con recarga limitada (Herrera y Gutiérrez, 2012).

Por otro lado, en los páramos altos de la cordillera se cree que gran parte de la humedad proviene de la cuenca de la Orinoquía que, a su vez, proviene de la cuenca Amazónica y del océano Atlántico.

A medida que las nubes se trasladan hacia el occidente, paralelamente, se espera una saturación baja del agua, en tanto que se hacen más pobres desde el punto de vista isotópico (Mariño et al., 2017).

Es así que, el objetivo de la presente investigación es definir si la recarga de los acuíferos de los llanos de Casanare se está dando por tres posibles fuentes (hipótesis): 1) de manera vertical por la precipitación, 2) por los ríos, o 3) desde las partes altas de la cordillera Oriental de los Andes (Figura 23).

Figura 23

Ubicación de las traversas o recorridos de muestreo en las cuencas de los ríos Casanare-Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare



5.1 Metodología isotópica

Los isótopos son átomos que tienen el mismo número atómico y de protones, no obstante, estos poseen un número diferente de neutrones, por lo que presentan una masa ligeramente desigual. Estos se dividen en dos tipos: estables e inestables. Por un lado, los inestables, también conocidos como radioisótopos, sobrellevan modificaciones nucleares propias de la naturaleza y emiten radiaciones conocidas como radiactividad (Herrera y Gutiérrez, 2012).

Por el otro, los estables no son radiactivos, así que no son nocivos. Para esta investigación se escogieron, el deuterio (^2H) que es un isótopo del hidrógeno, y el oxígeno-18 (^{18}O) que es un isótopo del oxígeno. Esencialmente, estos dos tipos de isótopos siempre se encuentran en el agua de manera natural (Mariño et al., 2017).

Conviene saber que, la constitución isotópica de una muestra de agua no es detallada en términos absolutos, por el contrario, se menciona en términos relativos. Por lo tanto, los isótopos estables se nombran de acuerdo con la relación a un patrón o estándar llamado SMOW “*Standard Mean Ocean Water*”, que representa la concentración isotópica media del océano. Los datos son presentados en unidades de desvío δ (delta) con relación al estándar (Faure, 1998).

Los estándares más utilizados para los isótopos estables del agua son: SMOW, y VSMOW o Viena, que es el estándar utilizado por la OIAE (Organización Internacional de Energía Atómica) localizada en Austria. Para la presente investigación se usó el estándar VSMOW. Los valores de desviación Delta (δ) de las ecuaciones 4 y 5 expresan la correspondencia entre los valores isotópicos de la muestra y los valores isotópicos del patrón o estándar. (Ecuación 5)

$$\delta = R - R_{smow}$$

La Ecuación 6, indica la manera como se puede presentar la composición isotópica de cada muestra (R) a partir de la abundancia isotópica del isótopo pesado fraccionada por la abundancia del isótopo, así:

(Ecuación 6)

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{R_{muestra} - R_{estándar}}{R_{estándar}} \right] * 1000$$

Donde, $R_{muestra}$ es la correlación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la muestra y $R_{estándar}$ es la correlación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del estándar. δ se expresa, según la Ecuación 6, a partir de la discrepancia en tanto por mil (‰) entre las relaciones de la muestra y las relaciones del estándar.

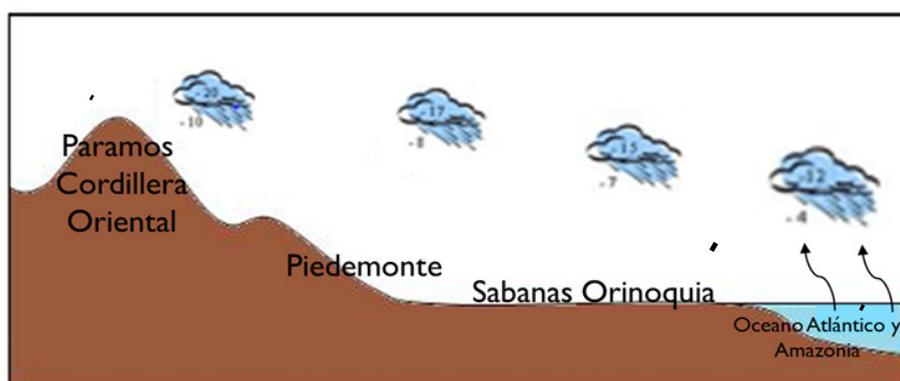
En resumen, un valor positivo de δ revela que la muestra se ha enriquecido gracias al isótopo pesado con relación al estándar (agua de mar); por otro lado, un valor negativo de la muestra revela lo opuesto.

Como los isótopos de ^2H (deuterio) y de O^{18} (oxígeno18) son levemente más pesados que los átomos primarios de hidrógeno-1 y oxígeno-16 porque tienen mayor número de neutrones, las moléculas de agua presentes en las nubes que contengan dichos isótopos (^2H y ^{18}O) se caen o se precipitan rápidamente, por lo que las nubes se van empobreciendo en estos dos isótopos en cuanto se alejan de la fuente donde se levantaron por evaporación del agua. Ese empobrecimiento hace que las unidades de desviación delta (δ) del ^2H y del ^{18}O se hagan cada vez más negativas (empobrecidos en esos dos isótopos) por fraccionamiento isotópico.

En consecuencia, y por lo que en el agua condensada en forma de vapor (en un proceso que implica el equilibrio de fraccionamiento), los isótopos más pesados del agua (^2H y ^{18}O) se concentran en la fase líquida, mientras que los isótopos más ligeros (^2H y ^{16}O) tienden hacia la fase de vapor. Por esta razón, a medida que la nube se desplaza y pierde lluvia, se vuelve más pobre en isótopos pesados (Figura 24).

Figura 24

Empobrecimiento isotópico de las nubes desde el océano hacia el continente



En la Orinoquía, la meta final fue establecer la conexión hidráulica de los sistemas de la parte alta (páramos) con los regímenes de la parte baja (sabanas o llanuras). En este sentido, si los valores isotópicos son parecidos o afines, se asume que los sistemas de la parte baja son recargados por agua subterránea surtida por la lluvia y por los ríos de la parte alta.

De otro lado, si los valores difieren altamente, se puede concluir que la recarga principal de la parte baja se da como consecuencia de la infiltración vertical local a partir de la precipitación, que debe estar más enriquecida (o menos empobrecida) que la parte alta (Calvo, 2020).

En la zona oriental de Boyacá y zona occidental de Casanare (costado este de la cordillera Oriental) una parte amplia de la lluvia proviene de la cuenca de los Llanos Orientales, la que en últimas proviene de la cuenca del río Amazonas y del océano Atlántico. Con el desplazamiento de las nubes en dirección occidente, se espera que estén menos saturadas de agua, mientras se empobrecen isotópicamente (Figura 24) (Mariño et al., 2017; Rozansky, 2002; Calvo, 2020).

De tal forma que, el muestreo para la medición de isótopos de hidrógeno (deuterio- ^2H), oxígeno (^{18}O) y tritio se hizo entre 2016 y 2017 en 156 puntos de agua (lluvia, ríos, esteros, manantiales, lagunas, aljibes, pozos), desde las frías montañas de la cordillera Oriental hasta el gran río Meta; a lo largo de tres grandes traversas de más o menos 200 km, así: 1) río Casanare-Guachiría, 2) río Cravo Sur y 3) río Cusiana (Figura 25).

Los análisis de los cerca de 40 puntos de muestreo en cada travesa, en aguas superficiales y subterráneas, permitieron determinar la conexión hidráulica subterránea entre la cordillera de los Andes y las sabanas de la Orinoquía en Casanare. Los análisis isotópicos se hicieron en el Laboratory of Isotope Geochemistry de la Universidad de BYU-Brigham Young University en Utah (Estados Unidos).

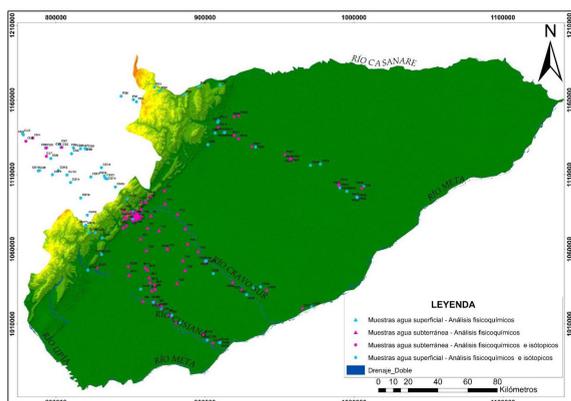
El tercer isótopo utilizado es el tritio (^3H) que es útil para determinar de edad relativa de las aguas. La concentración de ^3H en el agua de lluvia en circunstancias de equilibrio es posiblemente de unas 5 UT, que equivale a una actividad específica de unos 0,6 Bq/L (Calvo, 2020). Después de los ensayos nucleares de los años 60, el contenido de ^3H en el agua de lluvia se hizo 1.000 veces mayor en el hemisferio norte. Desde entonces, y a raíz de la disminución en los ensayos nucleares, el contenido extremo de ^3H ha venido menguando hasta alcanzar valores típicos de invierno y el doble en verano.

“Una gran parte del ^3H que se originó en las explosiones nucleares se introduce a la estratosfera. Este vuelve a la troposfera cada año durante la primavera e inicios de verano. Esto es lo que provoca las variaciones estacionales del ^3H , las cuales son pronunciadas en el tritio, ya que el tiempo de residencia en la atmósfera del H_2O al que se asocia el ^3H , es de un par de semanas” (Mook, 2000, pág. 31).

A partir de la concentración de tritio se determina si las aguas entraron en contacto con los componentes de las explosiones nucleares y, por lo tanto, son modernas (recientes), de lo contrario se consideran submodernas (antiguas).

Figura 25

Puntos de muestreo a lo largo de la cuenca de los ríos Casanare-Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare



5.2 Resultados

Como no fue posible tomar muestras de agua de lluvia con una repetición mensual para permitir la construcción de la línea meteórica propia, se usó la línea meteórica colombiana propuesta por Rodríguez (2004), de tal manera que, se pudiera hacer los estudios isotópicos, así:
(Ecuación 7)

Cada una de las tres traversas (ríos Casanare-Guachiría, río Cravo

$$\delta D = 8.03 * \delta^{18}O + 9,6\%$$

Sur, y río Cusiana) ocupan alrededor de unos 200 km de largo, y se presentan de NW a SE. En cada travesa, el muestreo y los análisis se realizaban desde las altas montañas frías (3.000-3.500 m s. n. m.) pasando a través de la selva tropical en el piedemonte, las sabanas proximales, y finalmente, cruzando las sabanas bajas distales cerca del río Meta (120 a 50 m. s. n. m.) donde todos los ríos del Casanare convergen al río Meta como un enorme delta (Figura 25). Por brevedad solo se presentan detalles de la **travesa a lo largo del río Cravo Sur** (Figuras 23 y 25) en época de lluvia.

De tal manera que, se pueda responder apropiadamente al análisis de isótopos estables (deuterio y oxígeno-18) encontrados en el río Cravo Sur, se usaron un total de 38 muestras, recogidas en temporada de lluvias en la operación llevada a cabo entre septiembre y octubre de 2018, del total, 24 muestras corresponden a aguas de superficie (5 de humedales como lagunas y esteros, 19 de ríos, quebradas o caños) y 14 muestras de aguas subterráneas (1 aljibe y 13 pozos) (Calvo 2020).

Las muestras de agua de superficie y las muestras subterráneas provienen de la cordillera Oriental y llanos de Casanare, diseminadas en elevaciones que van de 3.600 a 100 m s. n. m., comenzando en los fríos páramos de la cordillera Oriental en el municipio de Mongua, pasando por Labranzagrande, Yopal, Quebrada Seca, El Cacho, hasta llegar al río Meta en el municipio de Orocué (Figura 25).

En general, el contenido de ^2H y ^{18}O en los páramos está más empobrecido en comparación con los pozos de la llanura que presentan un menor empobrecimiento. En los páramos, los valores delta de ^2H fluctúan entre $-68,75$ y $-61,72$ ‰ y los valores delta de ^{18}O fluctúan entre $-9,26$ y $-9,86$ ‰. En los pozos de la llanura, el contenido de la ^2H oscila entre $-24,87$ y $-49,17$ ‰ y el contenido de ^{18}O de contenido oscila entre $-5,30$ y $-8,19$ ‰ (Calvo, 2020).

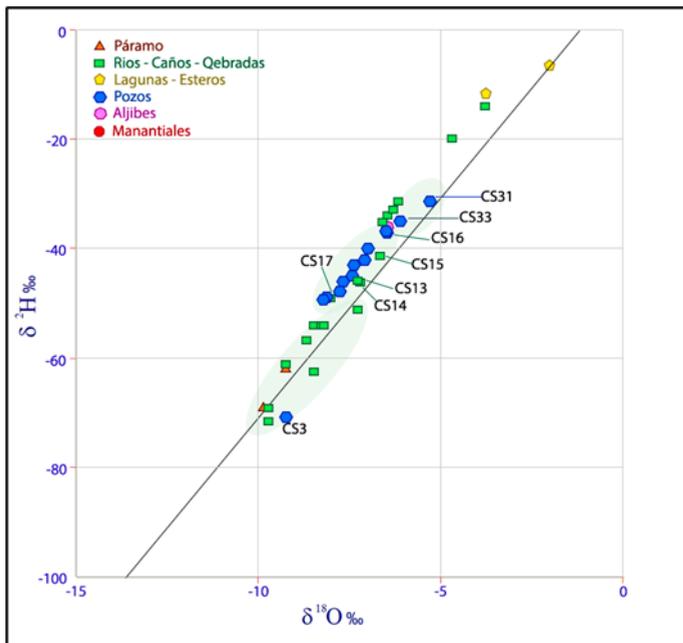
La Figura 26, presenta los resultados isotópicos de ^2H y ^{18}O del muestreo paralelo al río Cravo Sur durante el periodo de lluvias, en comparación con la línea meteórica de Colombia.

La localización en la figura de los puntos de agua superficial CS13, CS14, CS15, CS16 y CS17, que se tomaron entre 400 y 1.100 m s. n. m., muestran que la recarga de la precipitación de estas alturas se está presentando en los pozos de aguas subterráneas de la sabana proximal, sin embargo, esta recarga es indirecta ya que es llevada por las corrientes de agua superficial. La localización de las muestras de pozos de agua subterránea CS33 y CS31, indica que la recarga directa por la lluvia predomina en estos puntos (Figura 26).

En las muestras correspondientes a esteros, es evidente que exhiben más enriquecimiento isotópico que el resto de las muestras debido a los fenómenos de evaporación que se producen en dichas acumulaciones de agua no permanentes (Calvo, 2020).

Figura 26

Comparación de los valores delta (δ) de ^2H vs. ^{18}O , en la travesa a lo largo del río Cravo Sur (temporada de lluvias), comparado con la línea meteórica de Colombia de Rodríguez (2004)



Nota. Calvo (2020)

Si se observa en detalle la Figura 26, se nota que la señal isotópica de los páramos es diferente, y al contrastar la señal isotópica de las aguas profundas de las sabanas es evidente dicha observación, lo que sugiere que el nivel de relación hidráulica entre el agua de la alta montaña fría y el agua contenida en los pozos de la sabana es reducida durante la temporada de lluvias; por el contrario, las precipitaciones entre 400 y 1.100 m.s.n.m., están generando una porción de la recarga de los pozos de agua subterránea de las sabanas proximales, lo cual ocurre indirectamente debido a los flujos superficiales que vienen de estas elevaciones medias (piedemonte llanero).

Los altos valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la estación lluviosa en la travesa del río Cravo se sitúan, principalmente, entre $-6,2\text{‰}$ y $-7,4\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y entre -33‰ y -44‰ para $\delta^2\text{H}$ (Figura 27); De acuerdo con los estudios de Rodríguez (2004) que correlacionan el contenido isotópico con la altitud, la recarga de agua subterránea y superficial en los llanos se está presentando en dos alturas, una en altitudes inferiores a los 250 metros y otra en alturas entre los 1.000 y 1.500 m.s.n.m. , según la altitud y el enriquecimiento isotópico de ^{18}O y ^2H , de los datos tomados para fijar la línea isotópica meteórica Colombiana.

En donde, los análisis de ^2H y $\delta^{18}\text{O}$ indican que un gran porcentaje de la recarga de agua subterránea que está ocurriendo en altitudes menores a 250 m.s.n.m. en el piedemonte, es de infiltración directa en altitudes entre 1.000 y 1.500 m.s.n.m. y por recarga no directa por flujos superficiales (flujo regional).

El tritio se utilizó para estimar la edad relativa de las aguas subterráneas empleando la ecuación de desintegración radiactiva del tritio, asumiendo que la entrada del tritio es conocida en el sistema y que el tritio residual medido es el resultado, únicamente, de la desintegración radiactiva, por esto, el tiempo se determina a partir de su concentración.

Como las aguas superficiales de la llanura tienen valores de tritio entre $1,1 \pm 0,3$ UT a $2,7 \pm 0,3$ UT, se presume que su valor en la atmósfera en las zonas de muestreo está dentro de esta categoría. Por consiguiente, las muestras de agua subterránea PL25 (Formación Caja), CS18 (depósitos aluviales en abanico, depósitos fluviales simples y Formación Caja) y CU36 (depósitos fluviales simples) que presentan enriquecimientos de tritio entre 1,6 a 0,3 UT y 1,9 a 0 3 TU, pertenecen a una recarga moderna de menos de 10 años; por otro lado, las muestras PL21 (depósitos fluviales simples), PL27 (Formación Caja), PL34 (Formación Caja), CS22 (depósitos aluviales de abanico), CS27 (depósitos aluviales de llanura), CU4, CU6, CU23 (Formación Caja), CU30 (depósitos

fluviales simples), y CU34 (depósitos fluviales de llanura), que tienen valores $<0,3$ TU, pertenecen, posiblemente, a una recarga submoderna (mayor de 60 años).

Las muestras de agua subterránea recogidas de los sedimentos de la llanura de inundación y de la Formación Caja con concentraciones de tritio entre $0,5 \pm 0,3$ y $0,9 \pm 0,3$ se vinculan con una mixtura entre la recarga moderna y la submoderna o con una infiltración que se produjo entre los últimos 15 y 25 años.

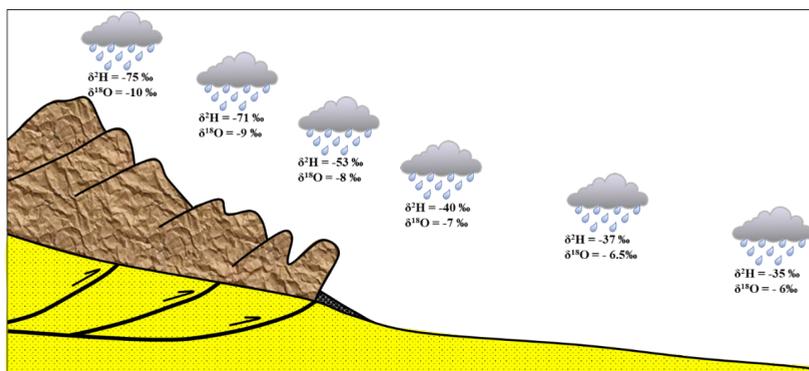
5.3 Análisis

Las muestras de aguas superficiales y subterráneas muestreadas para el análisis isotópico desde los páramos en altitudes de 3.600 metros en el costado este de la Cordillera Oriental que va hasta las llanuras del Casanare a unos 100 m.s.n.m., contribuyen a reconstruir modelos conceptuales de cómo se conectan las aguas superficiales y subterráneas, y las aguas de montaña y de sabana, en el área de estudio.

Los contenidos isotópicos en la zona muestran, principalmente, una inclinación de empobrecimiento hacia los páramos, con mayor agotamiento isotópico en las montañas más altas (páramos) ($\delta^2\text{H} = -75$ ‰ y $\delta^{18}\text{O} = -10$ ‰) en contraste con las sabanas distales inundadas ($\delta^2\text{H} = -35$ ‰ y $\delta^{18}\text{O} = -6$ ‰), que indican un claro pendiente de altitud y un fraccionamiento isotópico en la orientación SE - NO (Figura 27) concordante con el alejamiento de la humedad del Océano Atlántico y/o mar Caribe y de la cuenca del río Amazonas que son las fuentes naturales de humedad en la cuenca del Orinoco.

Figura 27

Modelo que muestra el fraccionamiento isotópico de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ desde las llanuras de Casanare hasta la cordillera Oriental en Colombia



Si se analizan los valores de $\delta^2\text{H}$ frente a los valores de $\delta^{18}\text{O}$, comparados con la línea meteórica de Rodríguez (2004) para Colombia, es claro que la señal isotópica de las altas montañas varía si se contrasta con la señal isotópica de las aguas profundas de la llanura, lo que indica la reducción del nivel de conexión hidráulica entre los páramos y las aguas de las sabanas distales pantanosas.

Así también, se puede observar que algunos pozos de aguas profundas, primordialmente aquellos que corresponden a la estación seca, tienen señales isotópicas parecidas a las de los ríos y arroyos de la llanura proximal, lo que indica que existe una conexión entre las aguas superficiales y las subterráneas, y que las aguas subterráneas, probablemente, ayudan al flujo base de las aguas de superficie (ríos).

No obstante, inclusive en la época de lluvias, algunas corrientes de superficie de la sabana tienen concentraciones isotópicas parecidas a las muestras de corrientes de superficie muestreadas a más de 2.000 m.s.n.m., lo que permite suponer que el agua que se precipita en las estribaciones de la Cordillera Oriental, tiene una contribución significativa en el flujo de las aguas de superficie de las sabanas proximales.

Unas pocas muestras tomadas de pozos localizados en las sabanas más distales e inundadas cerca del río Meta están enriquecidas isotópicamente y están por debajo de la línea meteórica colombiana (Rodríguez, 2004), dichos valores indican que es factible que la evaporación ocurra en los esteros y lagunas previamente a que se dé la recarga en los niveles del acuífero.

Los resultados isotópicos resaltados en los párrafos anteriores indican que en las sabanas del Casanare la infiltración de agua subterránea predominante es la recarga directa que proviene de las precipitaciones a altitudes inferiores a los 250 metros y la infiltración local (escorrentía laminar y proveniente de esteros y pantanos) a la misma altura donde se generan procesos de evaporación.

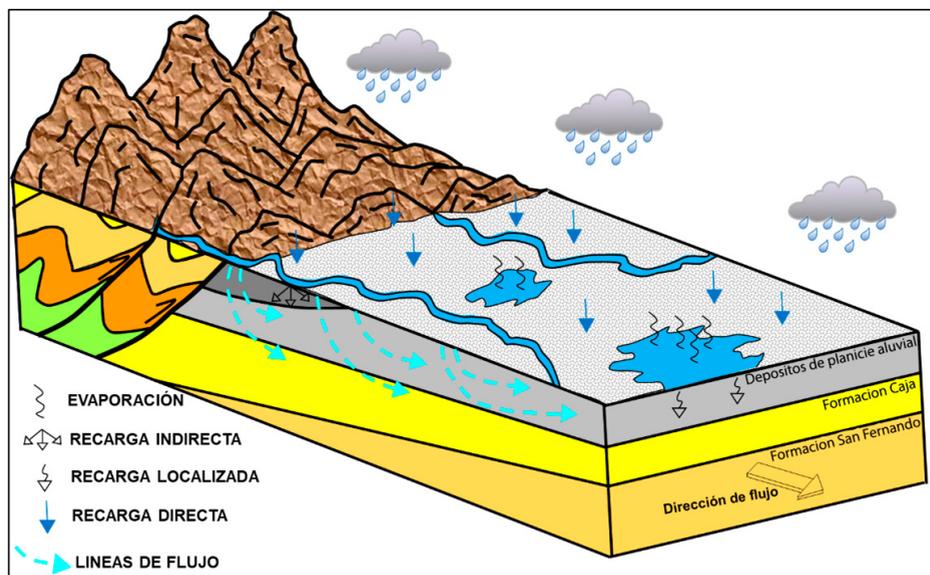
Sin embargo, también existe una recarga indirecta menor, correspondiente a las precipitaciones que ocurren entre los 1.000 y 2.000 m. s n. m, que infiltra a los acuíferos libres por los flujos superficiales que bajan de estas alturas (páramos) en el flanco oriental de la Cordillera Oriental (Figura 28).

Esta última recarga o flujo subterráneo regional se explica en parte por las numerosas fracturas en el piedemonte de la cordillera relacionadas con las diversas fallas regionales que contribuyen a acortar la corteza y a levantar la Cordillera (Cooper et al., 1995; Sarmiento et. al., 2006).

Los depósitos recientes de textura gruesa y los productos recientes del levantamiento, los ríos meandricos de alta energía en el piedemonte y las glaciaciones recientes, ayudan a aumentar la recarga de agua para una mejor conexión con las sabanas proximales (SGC, 2018).

Figura 28

Modelo conceptual que relaciona la infiltración de aguas subterráneas en las montañas, el piedemonte y las sabanas de Casanare



Nota. Calvo (2020)

Las desiguales concentraciones de tritio entre los pozos de agua superficial y el agua profunda subterránea de las sabanas del Casanare, que captan los niveles de los acuíferos de los depósitos aluviales de abanicos de los depósitos fluviales y de la Formación Caja (Guayabo), infieren disímiles tiempos de recorrido en las trayectorias de agua subterránea, que están generando mezclas.

Adicionalmente, los contenidos de tritio en pozos de más de 120 metros de profundidad, y que en algunos sectores alcanzan la formación Caja (Guayabo), indican que la recarga vertical moderna alcanza grandes profundidades. A partir de los valores de tritio se estableció que el agua subterránea es moderna (menos de 10 años) a submoderna (~ 60 años).