



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua
Carrera en Geociencias

***Caracterización y estimación de la recarga del acuífero
kárstico de la caverna de Jumandy, cuenca occidental
del río Amazonas (Ecuador)***

Jhon David Ortiz Barrionuevo

Tena, enero 2022
Napo, Ecuador

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 04 de octubre de 2021

Yo, Jhon David Ortiz Barrionuevo con documento de identidad N° 0922983838, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,

Firma:



Jhon David Ortiz Barrionuevo

Certificado de dirección de trabajo de integración curricular

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: “Caracterización y estimación de la recarga del acuífero kárstico de la caverna de Jumandy, cuenca occidental del río Amazonas (Ecuador)”, en la modalidad de proyecto de investigación en formato artículo original, fue realizado por: Jhon David Ortiz Barrionuevo, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 04 de octubre de 2021

Firma:



Firmado electrónicamente por:

**BRUNO
PIRILO**

Bruno Pirilo Conicelli

C.I: 1759149774

Tutor

INDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD.....	II
Certificado de dirección de trabajo de integración curricular.....	III
INDICE GENERAL	IV
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN.....	VII
Palabras clave	VII
ABSTRACT	VIII
Introducción.....	1
Área de Estudio.....	4
Materiales y métodos.....	6
Separación del hidrograma utilizando la curva de recesión maestra (MCR)	7
Resultados.....	8
Señal de descarga del manantial	8
Análisis del hidrograma de descarga	10
Análisis de las curvas de recesión	10
Separación del hidrograma de descarga	14
Discusión	15
Dinámica del proceso de recarga del acuífero kárstico caverna de Jumandy.....	15
Conclusiones	17
Referencias	19

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Cuenca Amazónica. B) Provincia Napo. C) Geología local de la zona de estudio, cantón Archidona. D) Mapa de la caverna de Jumandy denotando la ubicación del sensor de nivel de agua HOBO U20L (Jiménez, 2020).	5
Figura 2. Hidrograma de descarga del manantial e hietograma de la caverna de Jumandy (Marzo 2020 – Enero 2021).....	9
Figura 3. Eventos de recesión. Se seleccionaron 8 eventos de recesión del hidrograma de descarga del manantial completo para el análisis de las curvas de recesión.	11
Figura 4. Evento de recesión n° 8. Los componentes de flujo se identificaron a partir de los parámetros de recesión detallados en la Tabla 1. El mismo proceso se llevó a cabo para los eventos de recesión restantes.	12
Figura 5. Separación del hidrograma de descarga (Marzo 2020 – Enero 2021) los componentes de flujo (rápido y difuso) con base en el análisis de recesión realizado en los 8 eventos de recesión. Los eventos de recesión del 1 al 8 se identifican dentro de los recuadros en orden de izquierda a derecha.	14

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de recesión derivados de 8 eventos de recesión de la caverna de Jumandy. La columna R^2 hace referencia a la bondad del ajuste del modelo. Las últimas dos columnas muestran las fechas donde inicia y culmina cada evento de recesión seleccionado.....	12
--	----

RESUMEN

Los procesos de recarga en el medio kárstico están controlados por el epikarst y la zona vadosa, responsable de la función del almacenamiento y la transferencia del agua desde la superficie hacia el nivel freático, esto debido a la heterogeneidad del medio. El análisis del hidrograma de descarga es una metodología ampliamente usada en estudios hidrológicos de manantiales kársticos. La región Amazónica conforma parte del territorio nacional donde las formaciones de rocas calizas afloran en la superficie, sin embargo, el difícil acceso es la principal razón de la falta de estudios y por consecuencia, escasez de información. Esta investigación se llevó a cabo con el fin de determinar los mecanismos de recarga y cuantificar el aporte de cada uno de estos mecanismos. Los datos utilizados para la construcción del hidrograma fueron tomados de la descarga del manantial de la Caverna Jumandy entre los meses Marzo de 2019 y Enero de 2020. Se logró identificar dos componentes de flujo, donde el flujo difuso es el que contribuye con aproximadamente 76% de la recarga total, mientras que el 24% restante se le atribuye al flujo rápido, denotando así, la relación entre el componente de flujo difuso y el almacenamiento de agua en la zona vadosa.

Palabras clave: recarga, acuíferos kársticos, caverna de Jumandy, análisis de hidrograma, curvas de recesión, componentes de flujo.

ABSTRACT

The recharge process in the karst environment is controlled by the epikarst and the vadose zone, responsible for the function of the storage and transfer of water from the surface to the groundwater level, due to the heterogeneity of the environment. Discharge hydrograph analysis is a widely used in hydrological studies of karst springs. The Amazon region is part of the national territory where limestone rock formations emerge on the surface, however, difficult access is the main reason for the lack of studies and consequently, lack of information. This research was carried out in order to determine the recharge mechanisms and quantify the report of each of these mechanisms. The data used for the construction of the hydrograph were taken from the Jumandy Cavern spring discharge between March 2019 and January 2020. It was possible to identify two flow components, where diffuse flow is the one that contributes approximately 76% of the total recharge, while the remaining 24% is attributed to the rapid flow, thus denoting the relationship between the diffuse flow component and the water storage in the vadose zone.

Keywords: recharge, karst aquifers, Jumandy cavern, hydrograph analysis, recession curves, flow components.

Caracterización y estimación de la recarga del acuífero kárstico de la caverna de Jumandy, cuenca occidental del río Amazonas (Ecuador)

Characterization and estimation of the recharge of the karst aquifer of the Jumandy cavern, western basin of the Amazon River (Ecuador)

Resumen

Los procesos de recarga en el medio kárstico están controlados por el epikarst y la zona vadosa, responsable de la función del almacenamiento y la transferencia del agua desde la superficie hacia el nivel freático, esto debido a la heterogeneidad del medio. El análisis del hidrograma de descarga es una metodología ampliamente usada en estudios hidrológicos de manantiales kársticos. La región Amazónica conforma parte del territorio nacional donde las formaciones de rocas calizas afloran en la superficie, sin embargo, el difícil acceso es la principal razón de la falta de estudios y por consecuencia, escasez de información. Esta investigación se llevó a cabo con el fin de determinar los mecanismos de recarga y cuantificar el aporte de cada uno de estos mecanismos. Los datos utilizados para la construcción del hidrograma fueron tomados de la descarga del manantial de la Caverna Jumandy entre los meses Marzo de 2019 y Enero de 2020. Se logró identificar dos componentes de flujo, donde el flujo difuso es el que contribuye con aproximadamente 76% de la recarga total, mientras que el 24% restante se le atribuye al flujo rápido, denotando así, la relación entre el componente de flujo difuso y el almacenamiento de agua en la zona vadosa.

Introducción

La recarga de un acuífero se puede definir como un proceso en el que el agua se infiltra desde la superficie hasta la zona saturada en un tiempo determinado (Galvão et al., 2018). Este proceso se puede clasificar según sea la fuente de la recarga: recarga directa o difusa proveniente de la percolación del agua de lluvia a través de la zona vadosa; recarga indirecta o concentrada proveniente de los cuerpos de agua superficiales y recarga concentrada o focalizada en un punto (Galvão et al., 2018; Vélez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2004).

Cuando se abarca el tema de recarga es necesario considerar que en un medio kárstico la zona

vadosa cumple un rol importante ya que esta zona regula el proceso de la recarga mediante dos funciones: el almacenamiento y la transferencia del agua desde la superficie hacia el nivel freático (Jacob et al., 2008; Poulain et al., 2018).

Los acuíferos kársticos se caracterizan por una alta variabilidad en la dinámica del agua tanto en escala espacial y temporal, esto debido a la heterogeneidad en la conductividad hidráulica del medio (Ke et al., 2013). Esta heterogeneidad proveniente de la litología y la karstogénesis se asocia al concepto del epikarst, término usado para referirse a una zona superficial de alta permeabilidad y porosidad localizada en la parte superior dentro de la zona vadosa por debajo del suelo (Poulain et al., 2018; Williams, 2008).

La entrada del agua hacia el sistema kárstico se considera una dualidad en el proceso de recarga debido a las diferentes características del karst, que se manifiestan mediante la circulación de dos tipos de flujo derivados de la zona vadosa (Brkić et al., 2018; Ke et al., 2013). El primer tipo (flujo difuso) proveniente de las partes de baja permeabilidad de la zona vadosa, se lo relaciona con el drenaje de la porción almacenada en el epikarst y se identifica como un subsistema de recarga lenta o difusa, mientras que el segundo tipo se manifiesta como un flujo rápido y representa un subsistema de recarga rápida o focalizada el cual ocurre a través de fracturas, sin embargo, es necesario alcanzar la saturación para que se dé la transferencia rápida a través de estas rutas de infiltración (Poulain et al., 2018; Williams, 2008). Estos dos procesos de recarga conforman la curva de recesión (curva de disminución y curva de agotamiento) del hidrograma de descarga de un manantial kárstico (Cerino Abdin et al., 2021; Ke et al., 2013).

Existen una variedad de métodos para la estimación de la recarga en manantiales, donde la selección del método a utilizar depende de la disponibilidad de datos, condiciones topográficas, así como la escala temporal y espacial necesaria para su implementación, ya que en ocasiones la manera en la que se recolectan los datos no son suficientes para establecer un modelo hidrodinámico del agua subterránea en el medio kárstico (Baker et al., 2020; Barbieri et al., 2005; Islam et al., 2016). Las herramientas informáticas como el SIG han demostrado una gran confiabilidad al aplicar modelos de índices para la estimación de la recarga (Galvão

et al., 2018). Por otro lado, estudios hidrogeoquímicos basados en los análisis de isotopos estables son utilizados como complemento para esclarecer o mejorar el entendimiento del medio kárstico (Barbieri et al., 2005).

Los datos de descarga del manantial tienen la capacidad de describir el comportamiento hidráulico de los acuíferos, entre otras características hidrogeológicas mediante la forma del hidrograma construido a partir de estos datos de descarga (Brkić et al., 2018). Por esta razón, el método de análisis de los hidrogramas basados en la curva de recesión maestra con el fin de identificar los tipos de recargas ha sido ampliamente usado especialmente para medios kársticos, ya que permiten estimar las propiedades de los acuíferos mediante relaciones matemáticas entre la tasa de descarga del manantial y el tiempo (Cerino Abdin et al., 2021).

En el Ecuador, las formaciones compuestas de rocas calizas conforman entre el 5 y el 10% de la superficie total del territorio nacional, siendo las provincias de Guayas, Manabí, Napo, Pastaza y Morona Santiago donde se encuentran estas formaciones, sin embargo, el difícil acceso en la selva de la amazonia dificulta el estudio del karst superficial y subterráneo (Constantin et al., 2018). Las rocas calizas poseen una elevada permeabilidad, característica necesaria para la formación de acuíferos de gran potencial y relevancia. Los afloramientos de las formaciones de rocas calizas usualmente están compuestos por acuíferos colgados (Mullo, 2012), limitados entre las calizas y la capa de roca impermeable por donde circula el drenaje kárstico dando paso a la formación de estructuras kársticas como cavernas (Constantin et al., 2018), por las cuales puede circular un flujo de agua permanente, como es el caso de la caverna de Jumandy.

Los estudios hidrológicos en las cavernas kársticas de la región Amazónica son escasos. Constantin et al (2018) llevó a cabo un monitoreo de 6 meses de la tasa de goteo de la zona vadosa en la caverna de Jumandy observando fluctuaciones rápidas que reflejan los eventos de precipitación diarios sobre la caverna. Por otro lado, Jiménez (Jiménez, 2020) monitoreó la tasa de goteo a nivel semanal, además de llevar a cabo un monitoreo a tiempo real del flujo de agua que circula dentro de la caverna de Jumandy entre los meses de Marzo de 2019 y Enero de 2020 donde también se pudo observar una reacción rápida a la precipitación, al igual

que en el estudio de Constantin et al (Constantin et al., 2018).

Esta investigación tiene como fin determinar los mecanismos de recarga y cuantificar el aporte de cada uno de estos mecanismos, logrando así mejorar el conocimiento de la hidrodinámica del acuífero kárstico de la caverna de Jumandy. Para esto, se utilizó el método de análisis del hidrograma para identificar y cuantificar los mecanismos que producen la recarga y el aporte de cada uno de estos. Los datos utilizados en esta investigación fueron: a) la descarga del manantial derivada del nivel de agua dentro de la caverna medido por dos sensores HOBO U20L Water Level Data Logger con una resolución menor a 0.014kPa; b) y la precipitación registrada sobre la caverna mediante un pluviómetro RG3-M cuya precisión es de 0.2mm. Estos datos fueron recolectados desde finales de Marzo de 2019 hasta Enero de 2020 y fueron empleados para la construcción y posterior análisis del hidrograma de descarga del manantial de la caverna de Jumandy (Jiménez, 2020).

Área de Estudio

La caverna de Jumandy se encuentra localizada en la amazonia ecuatoriana, en el cantón Archidona, provincia de Napo (Figura 1). Esta caverna es una cavidad natural de morfología kárstica, desarrollada a partir de las rocas carbonatadas de la formación Napo, la cual está constituida por sucesiones repetidas de rocas calizas, lutitas y areniscas de origen marino somero, correspondiente a ciclos regresivos y transgresivos depositados durante el Cretácico (Baby et al., 2016; Estupiñan et al., 2010; Rodriguez & Toulkeridis, 2019; Vélez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2004). Se estima que la edad de la Formación Napo es alrededor de 100 millones de años (Sánchez-Cortez et al., 2017).

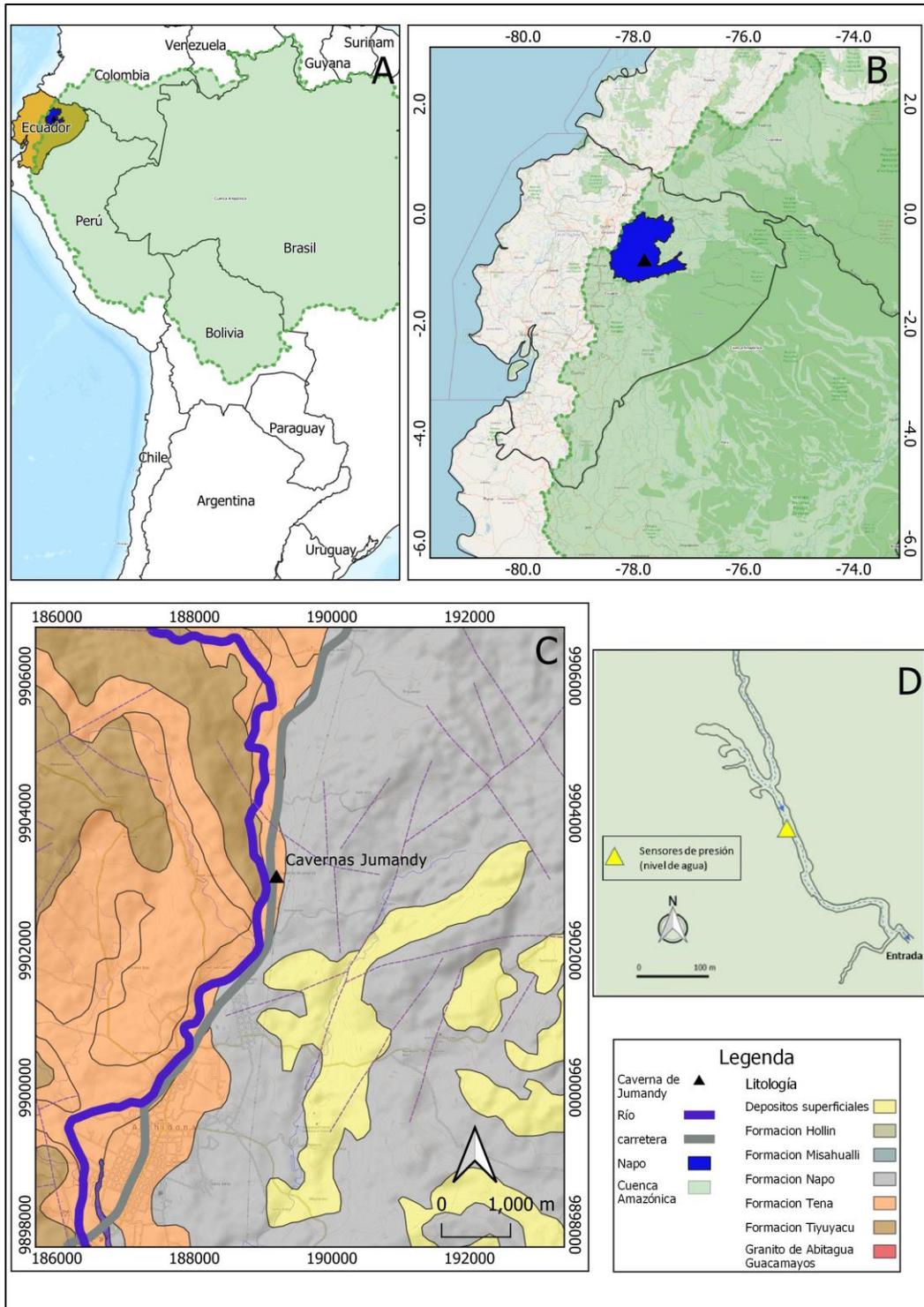


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Cuenca Amazónica. B) Provincia Napo. C) Geología local de la zona de estudio, cantón Archidona. D) Mapa de la caverna de Jumandy

denotando la ubicación del sensor de nivel de agua HOBO U20L (Jiménez, 2020).

La Formación se encuentra dividida en tres miembros: La Napo inferior que está compuesta por arenisca basal con una alternancia de arenisca glauconíticas, lutitas arenosas y calizas con textura clástica en menor proporción; La Napo medio está conformada por capas de caliza masiva con textura bioclástica y presencia de fósiles, intercaladas con capas de lutitas negras, areniscas calcáreas y capas de 15 cm de espesor de chert negro y; La Napo superior constituida por capas de lutitas interestratificadas con calizas de color oscuro y areniscas cuarzosas las cuales presentan fallamiento, diaclasamiento, erosión y alteración (Instituto Ecuatoriano de Minería, 1986). El espesor de cada miembro que conforma esta formación es variable. La Napo inferior varía entre 250 y 60 m., disminuyendo acorde se recorre desde el sur hacia el norte, mientras que la Napo Medio varía entre 75 y 90 m. y finalmente la Napo Superior alcanza espesores de hasta 320 m (Gobierno Provincial de Napo, 2015; Instituto Ecuatoriano de Minería, 1986; Mullo, 2012). Sin embargo, en la región kárstica de los cantones Tena y Archidona, el espesor de las capas de caliza es más delgado que el resto del karst en el Oriente ecuatoriano, por lo que el drenaje kárstico usualmente no supera los 20 metros de profundidad (Constantin et al., 2018).

Las rocas calizas de la Formación Napo poseen una elevada permeabilidad, característica importante para conformar un acuífero de relevancia. La mayor cantidad de estructuras kársticas se ubican al oeste de los centros poblados de Tena y Archidona.

El área de estudio se encuentra en una zona caracterizada por precipitaciones que varían alrededor de 4200 mm por año (Laraque et al., 2007), las cuales se distribuyen permanentemente a lo largo de todo el año, por lo que la diferencia entre los meses de mayor y menor precipitación es leve (Villacís et al., 2008).

Materiales y métodos

En la zona de estudio se realizó el monitoreo de variables meteorológicas dentro y fuera de la caverna. En el exterior se utilizó una estación pluviométrica automática (modelo RG3-M) ubicada sobre la caverna, la cual registró los valores de precipitación cuando se presentaba un incremento de 0.2 mm, así como la temperatura del aire y humedad relativa con una precisión

de $\pm 1.0\%$.

Por otro lado, en el interior de la caverna se designó un sitio de monitoreo ubicado a 200m de la entrada donde se emplearon dos Data Logger de nivel de agua (modelo HOB0 U20L) cuya resolución es menor a 0.014 kPa, con los cuales se determinó la fluctuación del nivel del agua en tiempo real. Mediante la aplicación de una curva de descarga, que relaciona el caudal y la altura del agua en la sección transversal de la caverna (junto a la ubicación del sensor, Figura 1D), se determinó el caudal que circula dentro de la caverna en escala diaria.

Separación del hidrograma utilizando la curva de recesión maestra (MCR)

La separación del hidrograma en sus diferentes componentes de flujo consistió en la construcción de la Curva de Recesión Maestra como lo describió Malik (Malik, 2015), donde se espera reconocer al menos dos componentes de flujo (flujo rápido y flujo difuso).

El método implica el uso de la solución analítica desarrollada por Maillet que describe segmentos de la curva de recesión de un acuífero con forma exponencial (ecuación 1):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (1)$$

Donde Q_0 y Q_t hacen referencia al caudal de descarga inicial y al caudal en el tiempo t respectivamente, mientras que α (alfa) es el coeficiente de recesión del componente de flujo difuso.

Por otra parte, el modelo propuesto por Kullman para describir segmentos de recesiones cuya forma es lineal se suele aplicar para identificar el componente de flujo rápido (ecuación 2):

$$Q_t = \left(\frac{1}{2} + \frac{|1-\beta \cdot t|}{2 \cdot (1-\beta \cdot t)} \right) \cdot Q_0 \cdot (1 - \beta \cdot t) \quad (2)$$

Donde β es el coeficiente de recesión para el componente de flujo rápido.

Para interpretar una curva de recesión individual o evento de recesión del hidrograma de descarga se puede aproximar a su forma mediante una función que corresponde a la suma de varios segmentos de forma exponencial y lineal (ecuación 3) (Malik, 2015).

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{0i} \cdot e^{-\alpha_i \cdot t} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} + \frac{|1-\beta_j \cdot t|}{2 \cdot (1-\beta_j \cdot t)} \right) \cdot Q_{0j} \cdot (1 - \beta_j \cdot t) \quad (3)$$

Donde cada valor de i y j representa un componente de flujo (flujo difuso y flujo rápido respectivamente).

Resultados

Señal de descarga del manantial

El monitoreo de la caverna se realizó entre los meses de Marzo del 2019 a Enero del 2020, lo que sirvió para generar el hidrograma de descarga de manantial y el hietograma de precipitaciones sobre la caverna a escala diaria (Figura 2).

Se determinó la existencia de 26 datos que pueden considerarse atípicos en la serie de tiempo del caudal en la zona de estudio, sin embargo, la mayoría de estas mediciones coincidieron con las datos de precipitación registrados, lo que implica que tales valores atípicos representan una respuesta a la valores altos de precipitación observada. Además, el registro de la serie de tiempo es muy corto para considerar estos datos como atípicos. Por estas razones se decidió no eliminarlos para los procedimientos posteriores.

Se pudo observar una fuerte variabilidad en el caudal de descarga del manantial de la caverna de Jumandy, llegando a 4.03 L/s el valor máximo registrado durante el mes de Noviembre, mientras que el caudal mínimo fue de 0.41 L/s, en el mes de Septiembre. Sin embargo, se pudo evidenciar una fuerte disminución de la señal de descarga entre finales de Diciembre y Enero. La precipitación sobre la caverna alcanzo un valor máximo de 131 mm observado en Noviembre, lo que coincidió con el valor máximos de descarga. Los meses de menor precipitación fueron agosto y septiembre de 2019, tiempo en que la descarga disminuyó considerablemente del resto de meses.

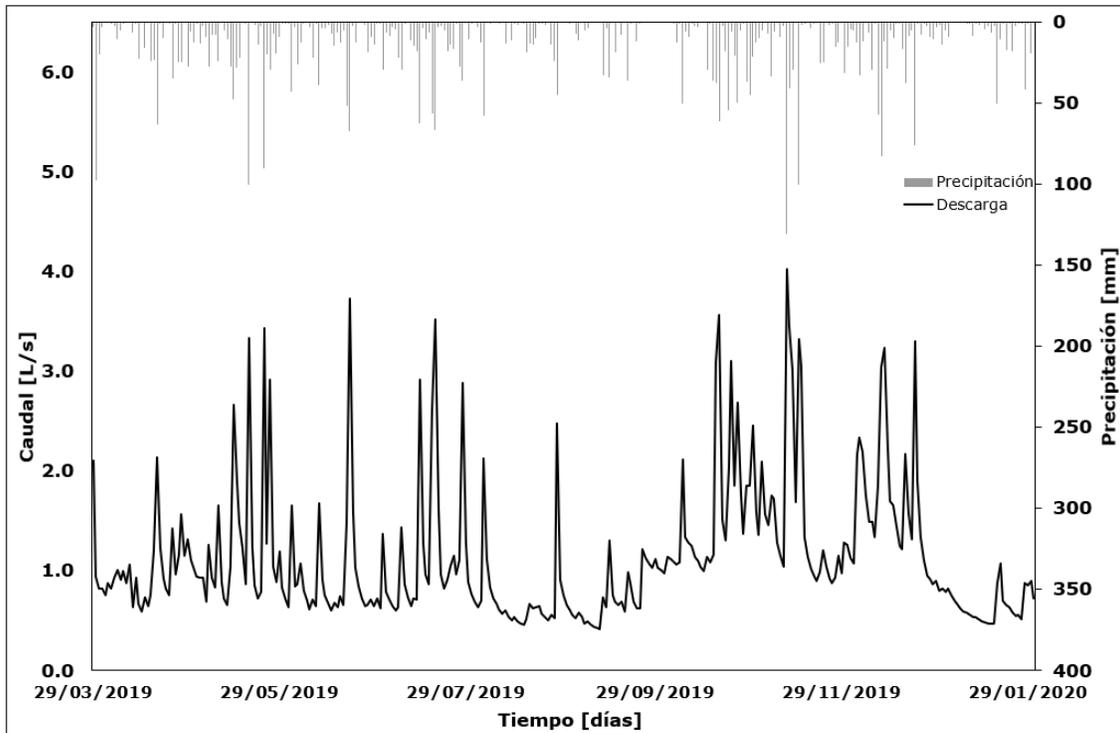


Figura 2. Hidrograma de descarga del manantial e hietograma de la caverna de Jumandy (Marzo 2020 – Enero 2021).

De manera general se pudo observar que la descarga del manantial tiene una reacción rápida (en escala de horas) a los eventos de lluvia, sin embargo, también presenta un descenso lento del caudal en ausencia de lluvias. Además, se pudo notar una variación en la descarga que se registró a inicios de Abril de 2019, la cual ocurrió con la presencia de eventos de lluvia muy escasos y de baja intensidad, un caso similar ocurrió a finales de Septiembre donde existió variación en la descarga sin presencia de lluvia (posiblemente por eventos de lluvia en áreas más alejadas a la zona donde se ubicó el pluviómetro, lo que implica que el área de la recarga se extiende a un área mayor a la que cubre la caverna). Además, es importante destacar que los picos de descarga más altos observados en el periodo de estudio, no siempre son el resultado de precipitaciones de altas intensidades, sino que en ocasiones se ven influenciados por precipitaciones previas, posiblemente debido al grado de humedad previo en la zona vadosa.

Análisis del hidrograma de descarga

El análisis del hidrograma es una metodología que consiste principalmente en dos procedimientos complementarios: el análisis de las curvas de recesión y la separación del hidrograma (Malik, 2015).

Análisis de las curvas de recesión

Previo al análisis de las curvas de recesión individuales provenientes del hidrograma de descarga es necesario la selección de secciones o porciones del hidrograma donde se identifican periodos de recesión. La evaluación de dichos periodos de recesión es subjetiva, a pesar de existir ciertos criterios para la selección.

Tallaksen (1995) considera tanto el inicio como la duración de los periodos de recesión. El inicio o también llamado descarga inicial puede ser un valor constante o variable. Si se considera la descarga inicial como una variable es importante asumir que las condiciones iniciales de humedad de la cuenca son similares para la descarga determinada ya que ambas están relacionadas. En cambio, si se define una descarga inicial como variable se considera un momento determinado después de la precipitación o después del pico de descarga. Normalmente la parte inicial del periodo de recesión es excluido para reducir la influencia del flujo superficial, del mismo modo la parte final para evitar la influencia de precipitaciones posteriores. La duración de los periodos de recesión puede ser considerado como un valor constante o variable, teniendo en cuenta que la duración mínima puede ser entre 4 y 10 días. En este caso de estudio se consideró una descarga inicial y el tiempo de duración variables para simplificar el proceso del análisis, ya que la presencia de precipitación de forma constante en la zona de estudio da como resultado la interrupción de los periodos de recesión dificultando la tarea de la selección. La mayoría de los periodos de recesión seleccionados (5) tuvieron duración entre 5 y 7 días. Se consideró integrar más periodos para el análisis, sin embargo, el tiempo de duración era inferior a 4 días en muchos de los casos, por lo que se decidió seleccionar tres adicionales cuyo tiempo de duración superaba a los 10 días, obteniendo finalmente 8 periodos o eventos de recesión para el estudio.

Cada uno de estos eventos fueron analizados para derivar los parámetros de recesión (caudal

inicial y coeficiente de recesión) de sus componentes de flujo (Figura 3 y 4, tabla 1) mediante la aproximación de una función que es la suma de segmentos de forma exponencial y lineal (α y β respectivamente) como se indica en la sección Metodología (ecuación 3). Cada uno de estos segmentos representa un componente de flujo.

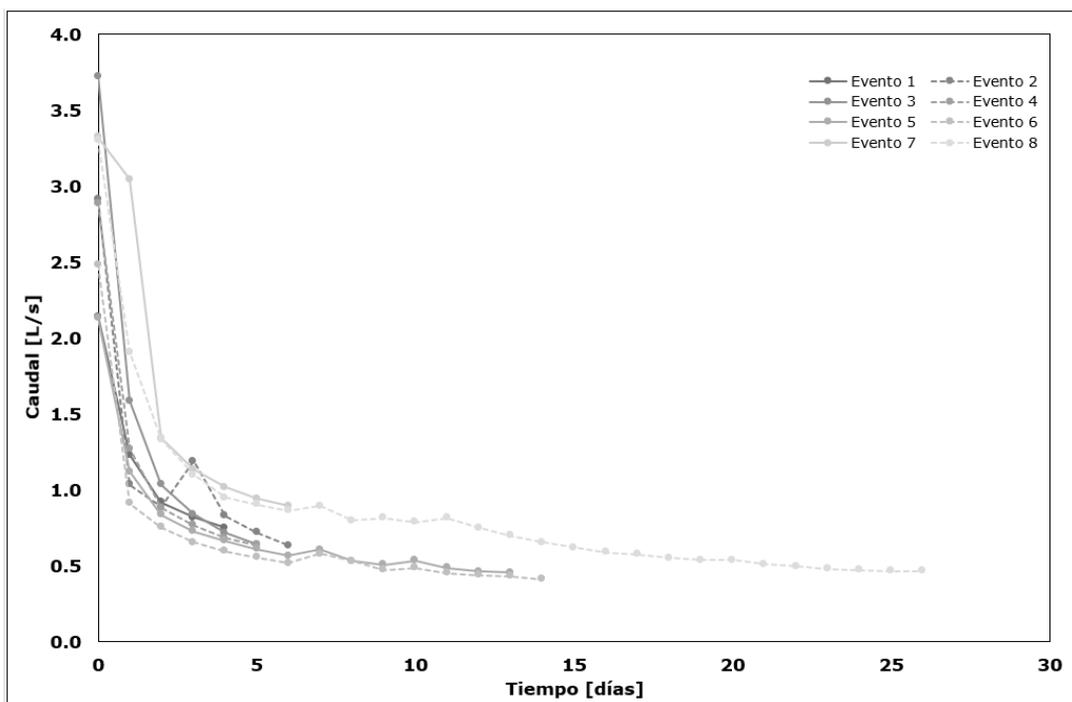


Figura 3. Eventos de recesión. Se seleccionaron 8 eventos de recesión del hidrograma de descarga del manantial completo para el análisis de las curvas de recesión.

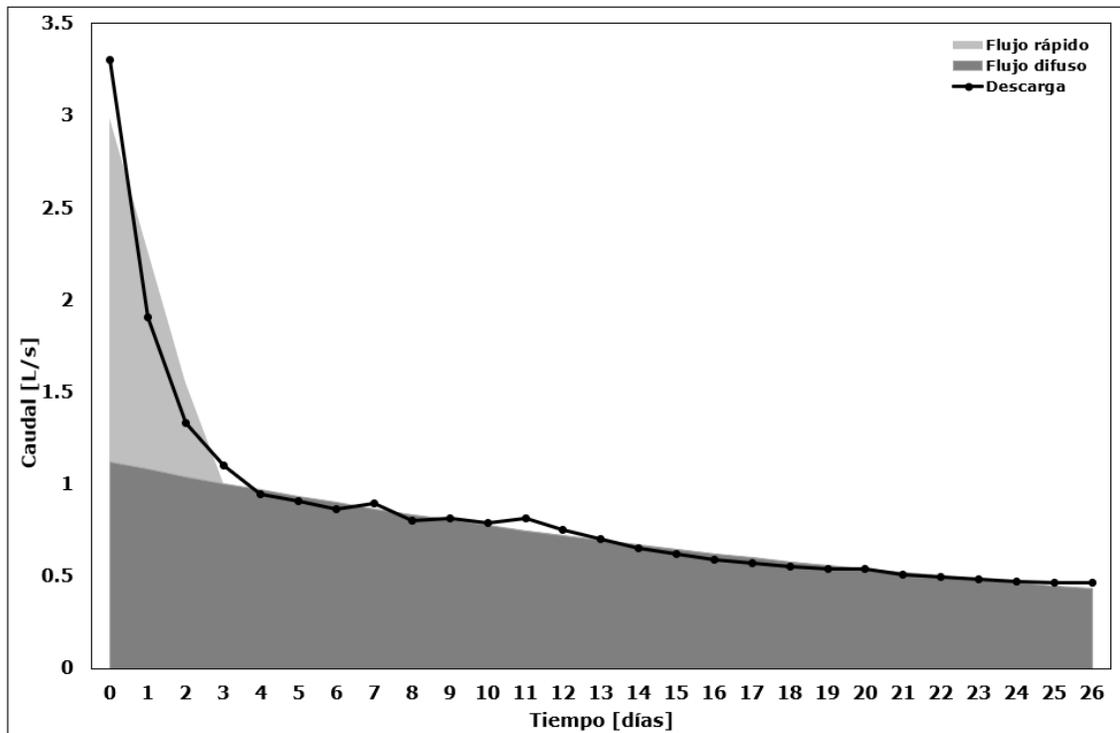


Figura 4. Evento de recesión n° 8. Los componentes de flujo se identificaron a partir de los parámetros de recesión detallados en la Tabla 1. El mismo proceso se llevó a cabo para los eventos de recesión restantes.

Tabla 1. Parámetros de recesión derivados de 8 eventos de recesión de la caverna de Jumandy. La columna R^2 hace referencia a la bondad del ajuste del modelo. Las últimas dos columnas muestran las fechas donde inicia y culmina cada evento de recesión seleccionado.

EVENTO	COMPONENTE DE FLUJO	COEFICIENTE DE RECESIÓN	CAUDAL INICIAL	R^2	INICIO	FINAL
1	Flujo difuso	0.102	1.123	0.994	19/04/2019	23/04/2019
	Flujo rápido	0.551	0.920	0.898		
2	Flujo difuso	0.203	2.042	0.932	26/05/2019	01/06/2019
	Flujo rápido	0.284	0.894	0.966		
3	Flujo difuso	0.160	1.387	0.983	21/06/2019	26/06/2019
	Flujo rápido	0.556	2.078	0.869		
4	Flujo difuso	0.110	1.080	0.984	28/07/2019	02/08/2019
	Flujo rápido	0.559	1.602	0.867		
5	Flujo difuso	0.043	0.779	0.917	04/08/2019	17/08/2019

6	Flujo rápido	0.381	1.098	0.802	28/08/2019	11/09/2019
	Flujo difuso	0.043	0.736	0.891		
7	Flujo rápido	0.552	1.510	0.808	15/11/2019	21/11/2019
	Flujo difuso	0.079	1.417	0.973		
8	Flujo rápido	0.357	2.037	0.859	23/12/2019	18/01/2020
	Flujo difuso	0.037	1.120	0.968		
	Flujo rápido	0.364	1.869	0.869		

α y β representan a los coeficientes de recesión exponencial y lineal respectivamente

Se identificó que la suma de un componente exponencial y uno lineal permitía un ajuste adecuado a las curvas de recesión. Los valores de los coeficientes de recesión varían moderadamente entre componentes de flujo, pero la variación entre eventos de recesión es ligeramente baja. Para el primer componente de flujo (α), los valores varían entre 0.04 y 0.20 (dia-1) (Promedio = 0.10; Desviación estándar = 0.06), mientras que para el segundo componente de flujo (β), los cuales son moderadamente mayores oscilan entre 0.28 y 0.56 (dia-1) (Promedio = 0.45; Desviación estándar = 0.11). Esta variación entre eventos de recesión para los coeficientes de flujo, tanto para el primer y segundo componente se puede deber a la estructura no homogénea del medio, ya que la aplicación de este método supone simplificaciones que considera medios homogéneos.

Por otro lado, el otro parámetro derivado de la curva de recesión es el caudal inicial, para el cual también se obtuvieron valores muy similares entre componentes de flujo, sin embargo, en el caso del segundo componente, de forma lineal (Q1), la mayoría de veces mostró valores ligeramente mayores a los del primer componente, de forma exponencial (Q0) en el mismo evento de recesión. Los valores de caudal inicial de Q0 oscilan entre 0.74 y 2.04 L/s (Promedio = 1.21; Desviación estándar = 0.42), mientras que Q1 varía entre 0.89 y 2.08 L/s (Promedio = 1.50; Desviación estándar = 0.48).

Los coeficientes de recesión en conjunto con las descargas iniciales de cada uno de los componentes proporcionan información relevante para determinar cuantitativamente de como la descarga del manantial decrece en el tiempo.

Separación del hidrograma de descarga

Para la separación del hidrograma fue necesaria la estimación del tiempo representativo, parámetro que comprende el tiempo que ha transcurrido desde el valor máximo de descarga (Malik, 2015; Poulain et al., 2018). El tiempo representativo interpretado en las ecuaciones de los componentes de flujo individuales permite realizar la descomposición de cada descarga del hidrograma completo por sus diferentes componentes de flujo (flujo rápido y flujo difuso) (Figura 5).

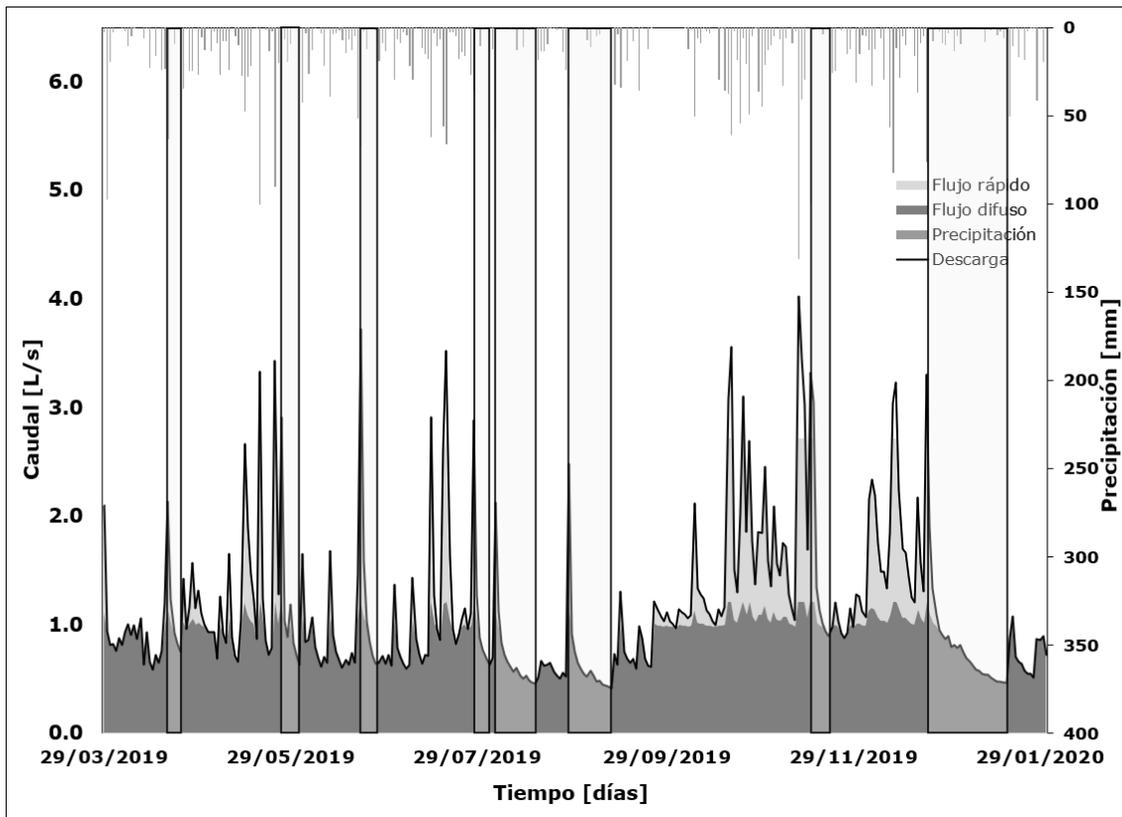


Figura 5. Separación del hidrograma de descarga (Marzo 2020 – Enero 2021) en sus componentes de flujo (rápido y difuso) con base en el análisis realizado en los 8 eventos de recesión. Los eventos de recesión del 1 al 8 se identifican dentro de los recuadros en orden de izquierda a derecha.

De la separación del hidrograma de descarga por sus componentes se pudo evidenciar que el primer componente muestra valores ligeramente más bajos a los del segundo. Para el primer

componente, la descarga máxima fue de 1.21 L/s y la mínima de 0.41 L/s (promedio = 0.87 L/s; DS = 0.21), mientras que para el segundo componente la descarga máxima fue de 1.50 L/s y 0,0026 L/s la mínima (promedio = 0.54 L/s; DS = 0.5).

Una vez obtenido la separación del hidrograma de descarga del manantial fue posible calcular el volumen total de descarga (56068.60 m³), así como el volumen descargado por los componentes de flujo difuso y rápido (42944.3 m³ y 13124.3 m³ respectivamente), siendo este primero el que representa alrededor del 76% del total de la descarga del manantial.

Discusión

Dinámica del proceso de recarga del acuífero kárstico caverna de Jumandy

Los resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión permitieron identificar que la dinámica de la recarga de la caverna de Jumandy se manifiesta mediante dos componentes de flujo, ajustándose al concepto del régimen de descarga de los acuíferos kársticos, el cual está compuesto por al menos dos o más partes denominadas como subregímenes o componentes de flujo que se encuentran superpuestos. Entre los componentes típicos en los acuíferos kársticos se encuentran el flujo rápido y el flujo difuso (Malik, 2015). El componente de flujo de menor coeficiente (α) representa el flujo difuso, el cual ocurre a través de la red de flujo de baja conductividad hidráulica (matriz rocosa), mientras que el componente de mayor pendiente o mayor coeficiente de recesión (β) representa el flujo rápido a través de las zonas de fracturas y fisuras de alta conductividad hidráulica (Poulain et al., 2018).

En el análisis que realizó Amit et al. (2002) sobre las curvas de recesión obtenidas del hidrograma de descarga de manantiales kársticos se demostró que las curvas se podían ajustar de manera correcta mediante 2 componentes de flujos expresados por funciones de forma exponencial, donde el componente de flujo de menor valor representa el flujo lento y el de mayor valor caracteriza el flujo rápido. Además, compararon los resultados obtenidos de los coeficientes de recesión con estudios similares en diferentes entornos llegando a la conclusión de que los coeficientes de recesión varían considerablemente ya que son fuertemente influenciados por la litología del acuífero. Esto implica la relación entre α y la porosidad de la matriz rocosa y a su permeabilidad, mientras que β se relaciona con el grado de fractura y

conectividad intrakarst. De esta forma, si comparamos nuestros resultados ($\alpha_{\text{promedio}} = 0.10$ (dia^{-1}) y $\beta_{\text{promedio}} = 0.45$ (dia^{-1})) con los resultados de la investigación que realizó Nurkholis et al. (2019), donde se llevó a cabo un enfoque similar, se puede apreciar una diferencia de varios órdenes de magnitud ($\alpha_{\text{promedio}} = 0.007$ y $\beta_{\text{promedio}} = 0.038$), teniendo como explicación la diferencia litológica de las zonas de estudio. Por lo que se puede afirmar que los coeficientes de recesión se relacionan con las propiedades hidrológicas específicas de un acuífero (litología y geometría de los conductos del agua), por otro lado, las descargas iniciales dependen de la cantidad de precipitación (Amit et al., 2002). Para mejorar el entendimiento de la influencia del epikarst y la zona vadosa en los procesos de recarga se sugiere que un estudio sísmico de la zona vadosa permitiría identificar de manera más precisa su composición litológica, el espesor de cada una de las capas que se encuentran encima de la caverna, así como la estructura del epikarst.

Giacopetti et al (2017) llevaron a cabo un estudio similar, basado en el análisis de la descarga de manantial, donde se identificaron las principales características hidrogeológicas y una aproximación teórica de las áreas de recarga.

Esta metodología también ha sido aplicada para el análisis de hidrogramas construidos a partir de datos registrados de la tasa goteo de espeleotemas de cavernas kársticas (Liu et al., 2016; Poulain et al., 2018; Sheffer et al., 2011) donde se pueden obtener resultados similares al enfoque aplicado a la descarga del manantial kárstico obteniendo así, la identificación de distintos tipos de flujos. El trabajo de Sheffer et al. (2011) logró identificar un flujo adicional denominado flujo intermedio, el cual ocurre a través de sistemas de fisuras secundarias. Por otro lado, Poulain et al. (2018) determinaron que la recarga está controlada por una recarga difusa y una recarga de flujo rápido efímero, además, logro cuantificar el volumen de agua que aportan cada uno de estos tipos de recarga a la recarga total.

La presencia de dos componentes de flujo que aportan con la recarga del acuífero de la caverna de Jumandy son congruentes con el trabajo elaborado por Jiménez (2020), estudio realizado con el fin de examinar la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de la precipitación y los cambios que se producen a medida que el agua se infiltra a través de la zona vadosa. Los resultados

obtenidos en dicha investigación revelan que el agua percolada es almacenada y se mezcla con agua de precipitaciones previas dentro del epikarst, además, se identificó una posible infiltración directa a través de fracturas y fisuras, lo que corresponde a la recarga difusa y recarga rápida identificadas en el análisis de las curvas de recesión.

El análisis de las curvas de recesión permite realizar una cuantificación de los volúmenes totales y la contribución de cada uno de los componentes de flujo. En los medios porosos fracturados se estima que el volumen drenado por el flujo base sea mucho mayor al volumen que se drena por parte del flujo rápido (Freeze & Cherry, 1979). Esto concuerda con nuestros resultados, donde la mayor parte (~76%) de la recarga en la caverna de Jumandy proviene de la infiltración difusa, mientras que la parte restante es un aporte de la infiltración rápida hacia la recarga.

Conclusiones

Los resultados demuestran que los mecanismos que aportan en el proceso de recarga son una combinación de un flujo difuso sostenido que proviene de las zonas de baja permeabilidad y un flujo rápido y efímero que proviene de las zonas de alta permeabilidad como las fracturas del medio kárstico. Ambos tipos de flujos contribuyen en la recarga y se manifiestan en la descarga del manantial. La recarga del flujo difuso es el mecanismo que aporta la mayor cantidad de agua (~76% de la recarga total), sin embargo este aporte se desarrolla de manera lenta y sostenida a través del tiempo, llevando a considerar que proviene de un importante almacenamiento en la matriz rocosa. El resto de la recarga (~24%) se le atribuye al mecanismo del flujo rápido, el cual se manifiesta con la presencia de eventos de precipitación y una vez se hayan saturado las zonas de baja permeabilidad.

Estos resultados permiten tener una estimación del agua que puede ser aprovechada por la población que no cuenta con acceso a agua segura, sin embargo, un análisis y monitoreo de la calidad de agua de la caverna de Jumandy, así como un estudio de la vulnerabilidad a la contaminación serían de vital importancia para la gestión de los recursos hídricos, evaluar estrategias de protección y rehabilitación de los acuíferos para asegurar un uso sostenible de los recursos de agua subterránea. Además, permite conocer el comportamiento de la caverna,

en cuanto a la hidrodinámica, lo que puede ser utilizado para la toma de medidas de seguridad a la hora de realizar internaciones, o para determinar cuándo se considera un entorno seguro para el ingreso, promoviendo así un turismo seguro.

Referencias

- Amit, H., Lyakhovsky, V., Katz, A., Starinsky, A., & Burg, A. (2002). Interpretation of Spring Recession Curves. *Ground Water*, 40(5), 543–551.
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2016). La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. In *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (pp. 13–20). Institut français d'études andines. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.2984>
- Baker, A., Berthelin, R., Cuthbert, M. O., Treble, P. C., Hartmann, A., & The KSS Cave Studies Team. (2020). Rainfall recharge thresholds in a subtropical climate determined using a regional cave drip water monitoring network. *Journal of Hydrology*, 587(February), 125001. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125001>
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., & Tallini, M. (2005). Stable isotope (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20(11), 2063–2081. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.008>
- Brkić, Ž., Kuhta, M., & Hunjak, T. (2018). Groundwater flow mechanism in the well-developed karst aquifer system in the western Croatia: Insights from spring discharge and water isotopes. *Catena*, 161(May 2017), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.011>
- Cerino Abdin, E., Taddia, G., Gizzi, M., & Lo Russo, S. (2021). Reliability of spring recession curve analysis as a function of the temporal resolution of the monitoring dataset. *Environmental Earth Sciences*, 80(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09529-2>
- Constantin, S., Toulkeridis, T., Moldovan, O. T., Villacís, M., & Addison, A. (2018). Caves and karst of Ecuador – state-of-the-art and research perspectives. *Physical Geography*, 3646, 1–24. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1461496>
- Estupiñan, J., Marfil, R., Scherer, M., & Permanyer, A. (2010). Reservoir sandstones of the cretaceous napo formation U And T members in the oriente basin, ecuador: Links between diagenesis and sequence stratigraphy. *Journal of Petroleum Geology*, 33(3), 221–245. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00475.x>
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater* (Vol. 148).

- Galvão, P., Hirata, R., & Conicelli, B. (2018). Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(10), 0. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>
- Giacopetti, M., Materazzi, M., Pambianchi, G., & Posavec, K. (2017). Analysis of mountain springs discharge time series in the Tennacola stream catchment (central Apennine, Italy). *Environmental Earth Sciences*, 76(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6339-1>
- Gobierno Provincial de Napo. (2015). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Calacali 2015-2019. In *Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural "Pachicutza."*
- Instituto Ecuatoriano de Minería. (1986). *Mapa Geológica de Tena.*
- Islam, S., Singh, R. K., & Khan, R. A. (2016). Methods of estimating groundwater Recharge. *International Journal of Engineering Associates*, 5(May), 6–9.
- Jacob, T., Bayer, R., Chery, J., Jourde, H., Le Moigne, N., Boy, J. P., Hinderer, J., Luck, B., & Brunet, P. (2008). Absolute gravity monitoring of water storage variation in a karst aquifer on the Irlzac plateau (Southern France). *Journal of Hydrology*, 359(1–2), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.020>
- Jiménez, P. (2020). *Variabilidad de isótopos estables del agua meteórica y percolada en la caverna de Jumandy, cuenca occidental del río Amazonas (Ecuador).* UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM, Facultad de Ciencias de la Tierra y Agua.
- Ke, T., Shu, L., & Chen, X. (2013). Modeling the groundwater recharge in karst aquifers by using a reservoir model. *Water Science and Technology*, 68(2), 406–412. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.266>
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., & Guyot, J. L. (2007). Heterogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the Ecuadorian Amazon basin. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6), 1364–1381. <https://doi.org/10.1175/2007JHM784.1>
- Liu, A. W., Brancelj, A., & Ellis Burnet, J. (2016). Interpretation of epikarstic cave drip water recession curves: a case study from Velika Pasica Cave, central Slovenia. *Hydrological*

- Sciences Journal*, 61(15), 2754–2762. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154150>
- Malik, P. (2015). Chapter 7: Evaluating Discharge Regimenes of Karst Aquifer. In *Karst Aquifers - Characterization and Engineering*. Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12850-4>
- Mullo, F. (2012). *Empleo de las Clasificaciones Geomecánicas, para la investigación del comportamiento Geotécnico de las excavaciones subterráneas en la central hidroeléctrica coca codo sinclair 1500MW*. Universidad Central del Ecuador. Facultad de ingeniería en geología, minas, petróleos y ambiental.
- Poulain, A., Watlet, A., Kaufmann, O., Van Camp, M., Jourde, H., Mazzilli, N., Rochez, G., Deleu, R., Quinif, Y., & Hallet, V. (2018). Assessment of groundwater recharge processes through karst vadose zone by cave percolation monitoring. *Hydrological Processes*, 32(13), 2069–2083. <https://doi.org/10.1002/hyp.13138>
- Rodriguez, F., & Toulkeridis, T. (2019). *Potencial turístico en las cuevas de la amazonia ecuatoriana*. July.
- Sánchez-Cortez, J. L., Cárdenas-Pinto, V., Ocampos-Valarezo, D., Jaque-Bonilla, D., Quilumba-Dután, D., Ortiz-Barrionuevo, J., Quinteros-Cevallos, R. A., & Toledo-Rojas, N. (2017). Aplicación de Proceso Metodológico para el Inventario Geoturístico de Cavidades Naturales en la Provincia de Napo – Ecuador. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 40(2), 61–73. https://doi.org/10.11137/2017_2_61_73
- Sheffer, N. A., Cohen, M., Morin, E., Grodek, T., Gimburg, A., Magal, E., Gvirtzman, H., Nied, M., Isele, D., & Frumkin, A. (2011). Integrated cave drip monitoring for epikarst recharge estimation in a dry Mediterranean area, Sif Cave, Israel. *Hydrological Processes*, 25(18), 2837–2845. <https://doi.org/10.1002/hyp.8046>
- Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. In *Journal of Hydrology* (Vol. 165).
- Vélez Otálvaro, M., & Vásquez Ariza, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances En Recursos Hidraulicos*, 11, 51–62.
- Villacís, M., Vimeux, F., & Taupin, J. D. (2008). Analysis of the climate controls on the isotopic

composition of precipitation ($\delta^{18}\text{O}$) at Nuevo Rocafuerte, 74.5°W, 0.9°S, 250 m, Ecuador. *Comptes Rendus - Geoscience*, 340(1), 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.11.003>

Williams, P. W. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review.

International Journal of Speleology, 37(1), 1–10. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.1>