

## Dinámica hidrológica ecosistémica en un bosque tropical seco asociado a un medio fracturado

Hydrological ecosystem dynamics in a tropical dry forest associated with a fractured environment

Landy Carolina Orozco-Uribe <sup>a\*</sup>, Marcos Adrián Ortega-Guerrero <sup>b</sup>,  
Manuel Maass <sup>a</sup>, Horacio Paz <sup>a</sup>

\* Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Michoacán, México, tel. +52 4151087164, ORCID ID 0000-0001-7831-1405, lorozco@iies.unam.mx

<sup>b</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Juriquilla, Querétaro, México.

### SUMMARY

Tropical dry forests (TDF's) are seasonal ecosystems that develop under complex hydrological systems. We analyzed the hydrological processes in three micro-basins on the southern coast of the state of Jalisco, Mexico, which sustain a TDF in a state of conservation on fractured granite. Although there is available information spanning more than 40 years regarding their physical and biotic dynamics, little is known about the functioning of their groundwater. The analysis was conducted using the following methods: 1) LiDAR images and fieldwork, 2) vegetation distribution and characterization of the fractured environment; 3) automated measurements of the precipitation-runoff response; 4) numerical simulations of the soil used to study the process of infiltration towards the fractured medium, and 5) integration and synthesis of existing multidisciplinary knowledge which includes key ecosystem components constituting the physiology of the soil-plant-atmosphere continuum. The results indicate that the distribution of vegetation and its phenology follow patterns suggesting the existence of local underground flows. Furthermore, the process of infiltration through the soil is remarkably fast towards the fractured rock, resulting in base flow in the streams. Consequently, the levels of infiltration and groundwater recharge are greater than previously considered. We propose a conceptual model of groundwater movement to guide research on ecosystem hydrology in seasonal contexts and in fractured rock environments.

*Keywords:* groundwater, recharge, discharge, LTER.

### RESUMEN

Los bosques tropicales secos (BTS) son ecosistemas estacionales que se desarrollan bajo una compleja dinámica hidrológica. Se analizaron los procesos hidrológicos en tres microcuencas en la costa sur del estado de Jalisco, México, las cuales sustentan un BTS en estado de conservación sobre granito fracturado, con información de más de 40 años sobre su dinámica física y biótica, pero donde poco se conoce sobre el funcionamiento del agua subterránea. El análisis se realizó por medio de: 1) imágenes LiDAR y trabajo de campo, 2) distribución de la vegetación y caracterización del medio fracturado; 3) mediciones automatizadas de la respuesta precipitación-escorrentía; 4) simulaciones numéricas del suelo para el estudio del proceso de infiltración hacia el medio fracturado, y 5) integración y síntesis del conocimiento multidisciplinario existente que añade componentes ecosistémicos clave sumando la fisiología del continuo suelo-planta-atmósfera. Los resultados mostraron que la distribución de la vegetación y su fenología sigue patrones que indican la existencia de flujos subterráneos locales y que el proceso de infiltración a través del suelo es muy rápido hacia la roca fracturada, que se manifiesta como flujo base en los arroyos. Así, la infiltración y recarga de agua subterránea es mayor a lo que previamente se consideraba. Se propone un modelo conceptual del movimiento del agua, que oriente la investigación sobre la hidrología ecosistémica en contextos estacionales y rocas fracturadas.

*Palabras clave:* agua subterránea, recarga, descarga, LTER.

### INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales secos (BTS) se encuentran ampliamente distribuidos en el mundo, 50 – 75 % de ellos en el continente americano. Se caracterizan por su estacio-

nalidad, siendo hábitat de una gran biodiversidad y proporcionando importantes servicios ecosistémicos (Stan y Sanchez-Azofeifa 2019). Es uno de los biomas más amenazados del mundo por el uso humano y por los efectos del cambio climático (Siyum 2020).

Sus respuestas ecológicas e hidrológicas a escalas detalladas de investigación son temas urgentes (Sun y Vose 2016, Stan y Sánchez-Azofeifa 2019), en particular, en rocas fracturadas de origen diverso que cubren más de la mitad de la superficie continental y que interactúan con el ciclo hidrológico y los ecosistemas asociados (Singhal y Gupta 2010, Poeter *et al.* 2020), en el contexto de los Sistemas Gravitacionales de Flujo de Agua Subterránea (SGFAS), que definen los procesos de recarga y descarga (Tóth 2016); donde la estacionalidad (Farrick y Branfireun 2015) puede estudiarse mediante la separación de hidrogramas (Duncan 2019).

En la costa sur del estado de Jalisco, México, existen extensas áreas cubiertas por BTS bajo condiciones de conservación sobre un medio geológico fracturado, y en las que se han efectuado proyectos de investigación del medio físico, biótico y socio ecológico de largo plazo desde hace más de cuatro décadas (Maass *et al.* 2002, Maass *et al.* 2018). En contraste, existen en la región comunidades humanas que dependen en gran medida para su subsistencia del agua subterránea, a través de pozos someros, manantiales o ríos permanentes (Saldaña-Espejel 2008). Los componentes de la interfaz vegetación-suelo son relativamente bien conocidos en el área; sin embargo, el conocimiento sobre las condiciones del subsuelo es muy escaso, principalmente en lo que respecta al agua subterránea (Rodríguez-Hernández 1999, Cortés-Ávila 2001, Schaaf 2002).

El objetivo de este estudio es analizar los procesos que controlan la recarga y descarga de agua subterránea y su relación con los demás componentes estacionales del ciclo hidrológico con el fin de generar un modelo detallado que permita estudiar de manera integrada los procesos y la generación de servicios ecosistémicos hidrológicos en armonía con las condiciones fenológicas de la vegetación y el suelo.

## MÉTODOS

*Área de estudio.* El área de estudio se encuentra en la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala localizada en costa sur del estado de Jalisco en México, en tres (C1, C2 y C3) de cinco microcuencas bajo investigación de largo plazo desde 1981 (cuadro 1) (Maass *et al.* 2018). Sus coordenadas extremas son 19° 30' 14" N / 105° 02' 04" O y 19° 29' 39" N / 105° 02' 06" O.

Las microcuencas forman parte del microbloque geológico "El Colorado", que forma parte del "Bloque de Jalisco", en el que afloran granitos, granodioritas y tonalitas, con edades de 120 Ma. Están ubicadas en lomeríos bajos con altitudes de 20 a 180 m s.n.m. y pendientes de 8° a 35°, con laderas predominantemente convexas y superficies cumbrales redondeadas. Muestran un profuso fracturamiento derivado de la historia tectónica de la región, asociada a diferentes sistemas de fallas; el sistema principal es NO - SE formando un ángulo promedio de 45° con el sistema secundario (Rodríguez-Hernández 1999, Cortés-Ávila 2001). La red fluvial está controlada por los lineamientos y por las pendientes ocasionadas por las formas de las laderas (Rodríguez-Hernández 1999).

Las unidades morfoedafológicas corresponden a superficies cumbrales (Sg) y laderas irregulares (Lg) ambas sobre granito. Los suelos son de poco espesor (0,30 - 1,00 m), y se desarrollan por efecto del intemperismo. Se clasifican como lixisol háplico en las superficies cumbrales (Sg) y regosol luvi-eútrico en las laderas, partes bajas y salida de las cuencas (Lg), ambos con alto porcentaje de pedregosidad (Cotler *et al.* 2002, Schaaf 2002). Los suelos presentan alta infiltración dada por su textura arenosa (López-Guerrero 1992, Cotler *et al.* 2002), que es potenciada por el desarrollo de porosidad secundaria debida a la actividad biológica (Cotler *et al.* 2002).

**Cuadro 1.** Características generales de las cuencas de estudio (Cervantes-Servín *et al.* 1988, López-Guerrero 1992).

General characteristics of the study basins (Cervantes-Servín *et al.* 1988, López-Guerrero 1992).

Característica	C1	C2	C3
Superficie (ha)	14,91	19,29	28,03
Cota topográfica mínima (m s.n.m.)	30	40	40
Cota topográfica máxima (m s.n.m.)	180	190	200
Área basal de la vegetación (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	17,2	20,2	23,2
Densidad de la vegetación (ind. ha <sup>-1</sup> )	774	673	534
Longitud del cauce (m)	694,19	702,64	923,16
Pendiente del cauce (%)	15,5	13,4	8,9
# Tributarios	0	4	8
Longitud de tributarios (m)	0	417	936
Velocidad media de escurrimiento (km h <sup>-1</sup> )	0,32	0,32	0,18

El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw0i), siendo el más seco de los subhúmedos. La precipitación promedio anual es de 832 mm  $\pm$  277 mm (Takano-Rojas *et al.* 2023); la mayor parte de los eventos son nocturnos y < 20 mm, representando el 28 % de la lluvia total anual (Maass *et al.* 2018). La temporada de lluvias, conocida como “monzón mexicano” inicia de manera regular a mediados del mes de junio o inicios del mes de julio con una duración promedio de 5 meses, con una mayor entrada de agua por eventos ciclónicos. Casi todos los años presentan un período seco durante las lluvias conocido como “canícula”. La temporada seca presenta una duración promedio de 7 meses, iniciando entre los meses de noviembre y enero y pudiendo presentar eventos de precipitación importantes aislados (Maass *et al.* 2018).

La vegetación corresponde al bosque tropical caducifolio (BTC) cubriendo la mayor parte de la superficie, y el bosque tropical subcaducifolio (BTSC) en las orillas de ríos y arroyos. La diversidad de especies vegetales es muy alta con predominancia de leguminosas y ocurrencia de parches monodominantes. La composición y estructura de la vegetación varía altitudinalmente, reduciéndose la riqueza, el diámetro, el área basal y la altura promedio de los árboles en las partes altas respecto a las laderas y partes bajas de las cuencas (Durán *et al.* 2002). La principal característica del BTC es la pérdida de hojas durante la temporada seca (Bullock 2002, Durán *et al.* 2002), la altura de los árboles varía de 5 a 10 m en promedio, las copas son convexas y el dosel es cerrado o semicerrado, los troncos son delgados con DAP menores a 10 cm (Durán *et al.* 2002). El principal patrón de transpiración está compuesto por especies que no cierran sus estomas al mediodía. El 90 % de la biomasa de raíces se concentra en los primeros 40 cm del suelo (Rentería-Rodríguez 1997). Por su parte, el BTSC ostenta un follaje más oscuro y mantiene sus hojas por mayor tiempo o permanentemente, la altura de los árboles es de 20 m en promedio y los troncos son más gruesos, con DAP mayores a 30 cm (Durán *et al.* 2002). El patrón de transpiración principal de este tipo de vegetación es el cierre estomático a medio día. El 69 % de la biomasa de raíces se concentra en los primeros 40 cm del suelo (Rentería-Rodríguez 1997).

Se presentan tres tipos principales de estrategias funcionales respecto a la resistencia a la sequía: evasión, tolerancia y vulnerabilidad, esta última conocida también como intolerancia o explotación (Borchert 1994, Markesteijn y Poorter 2009, Méndez-Alonzo *et al.* 2013). La evasión se muestra con la rápida pérdida de hojas, maderas de baja densidad y alta conductividad de savia, pero poco tolerantes a la cavitación, que almacenan agua, y con raíces tanto profundas como superficiales. La tolerancia se muestra en una permanencia prolongada o permanente de hojas, con maderas densas, baja conductividad, pero muy resistentes a la cavitación, escaso almacenamiento de agua en el xilema y con raíces profundas. La vulnerabilidad se presenta en especies con permanencia prolongada o per-

manente de hojas, que maximizan la producción de superficies de captura de agua y luz, con alto consumo de agua y baja resistencia a la falla hidráulica, cuentan con raíces superficiales y están restringidas a sitios húmedos. Aunque las comunidades de bosque en el área de estudio presentan las tres estrategias, la evasión ocurre mayormente para el bosque tropical caducifolio y la tolerancia y vulnerabilidad en el bosque tropical subcaducifolio (Markesteijn y Poorter 2009, Méndez-Alonzo *et al.* 2013, Pineda-García *et al.* 2015).

La distribución de la vegetación y su relación con las zonas de recarga y descarga se realizó mediante la clasificación de superficies en una ortofoto con resolución de 1m generada por un vuelo LiDAR, utilizando el sistema de información geográfica QGIS ver. 3.22.3.

Se identificó y georreferenció la localización de mantiales e individuos aislados de árboles con alta vulnerabilidad a la sequía (*e.g.* *Ficus* spp., *Coccoloba* sp.) (Markesteijn y Poorter 2009, Méndez-Alonzo *et al.* 2013) dentro de las microcuencas con un GPS Garmin.

La caracterización de fracturas se realizó utilizando una brújula tipo Brunton y cinta métrica en diferentes frentes rocosos expuestos y accesibles. Se determinó su densidad, apertura, relleno, rumbo y buzamiento, presencia y tipo de raíces. Asimismo, se realizó un muestreo en cuadros de 100 x 100 m (1 ha) de la imagen de micro drenaje obtenida del vuelo LiDAR a una resolución de 1 m en el programa QGIS ver. 3.22.3. Se obtuvo un diagrama de polos y rosetas de fracturamiento para ambos muestreos utilizando Stereonet (versión 11.1.0 64 bit).

Los datos de precipitación se obtuvieron de la estación meteorológica del “Observatorio Atmosférico Chamela” perteneciente a Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Se construyeron hidrogramas del primer evento de escurrimiento ocurrido en julio del año 2019 para cada microcuenca, de los cuales se separaron el flujo subterráneo (base) del superficial (hortoniano) por el método gráfico (Gonzales *et al.* 2009). Se calculó la evapotranspiración en condiciones de saturación, correspondiente a las zonas de descarga ( $ET_D$ ) a partir de la respuesta del hidrograma siguiendo el procedimiento de Cadol *et al.* (2012).

El escurrimiento se midió en vertedores con forma de “V” y canales tipo “H” ubicados a la salida de cada una de las microcuencas, con un sensor de columna de agua tipo “level logger” Solinst modelo 3.001, con una precisión de 0,1 mm en intervalos de 2 minutos corregidos a partir de los valores simultáneos de presión barométrica.

La respuesta del suelo al proceso de infiltración se obtuvo mediante el modelo VS2DT (Variably Saturated 2-D Flow and Transport Model), que permite simular el movimiento de agua en medios granulares con contenidos de humedad variables (Healy 1990). El flujo de agua en la zona no saturada del suelo está definido por la Ley de Darcy, bajo la ecuación:

$$q_z = -K(\psi) \frac{\delta h}{\delta z} \quad [1]$$

Donde  $q_z$  es la descarga específica en la dirección vertical  $z$ ,  $K(\psi)$  es la conductividad hidráulica como función de la carga de succión y  $\delta h / \delta z$  es el gradiente hidráulico en la dirección de flujo. El análisis evaluó el efecto del contraste de la conductividad hidráulica en el espesor de suelo granular, en función de los contenidos de humedad en el tiempo y del flujo hacia su frontera inferior que representaría la conexión con el medio fracturado. Consideró un periodo de simulaciones entre el 8 de julio (día 1), la primera lluvia del 11 de julio (día 4), la lluvia que originó el primer escurrimiento el 20 de julio (día 13) y el 22 de julio (día 15)

Considerando un suelo fundamentalmente arenoso (45 – 80 % arena, < 27 % limo y 20 – 35 % arcilla) y presencia de numerosas discontinuidades como macroporos y pedregosidad, se tomaron los siguientes parámetros (Clapp y Hornberger 1978, Gupta y Larson 1979):

- Conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ), entre 1 m d<sup>-1</sup>, representativa del tipo de suelo; y de 10 m d<sup>-1</sup>, considerando el efecto de los macroporos existentes;
- Almacenamiento específico ( $S_s$ ) = 1E - 07 cm<sup>-1</sup>;
- Porosidad 36 %, y
- Contenido de humedad residual 3 %

Las condiciones iniciales consideraron un contenido de humedad ( $\theta$ ) uniforme de 3,5 % en todo el perfil del suelo. Las condiciones de frontera para la parte superior fueron de tipo 2, de Newman o de Flujo definidas por la precipitación del día (mm d<sup>-1</sup>); en su parte inferior fueron de tipo 1, de Dirichlet o carga de presión definida (- 2 m). La estratigrafía del suelo se definió a partir de los registros de Cotler *et al.* (2002) con un espesor de 1 m.

Finalmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de documentos publicados a lo largo de más de 40 años de trabajo en la zona de estudio, realizando una integración sintética y un balance hidrológico con los datos disponibles para estimar el almacenamiento temporal de agua en el subsuelo (Freeze y Cherry 1979).

## RESULTADOS

La vegetación del BTC cubrió la mayor parte de las cuencas (46,37 ha) en laderas y partes altas y el BTSC se distribuyó en una superficie menor (15,70 ha) a orillas de ríos y arroyos y asociado a lineamientos, con pequeñas porciones desprovistas de vegetación (0,28 ha) (figura 1).

Se encontraron tres manantiales o individuos aislados de árboles vulnerables en las laderas sur y en altitudes similares (65 - 70 m s.n.m.). El manantial ubicado en C2 es permanente. La clasificación de puntos LiDAR por altura desde el suelo, arrojó una distribución de vegetación de

mayor altura hacia las partes medias y bajas de las cuencas. Las áreas con vegetación de BTC correspondieron con zonas de recarga y las áreas con vegetación de BTSC con zonas de descarga consistentes con los SGFAS (figura 2).

La medición en 192 fracturas mostró al menos tres familias, la más frecuente con rumbo NE - SO y un vector principal de 21,2°, seguido por los rumbos SE - NO (figura 3A y B). Las aperturas fueron de < 1 - 230 mm; en su mayoría sin relleno.

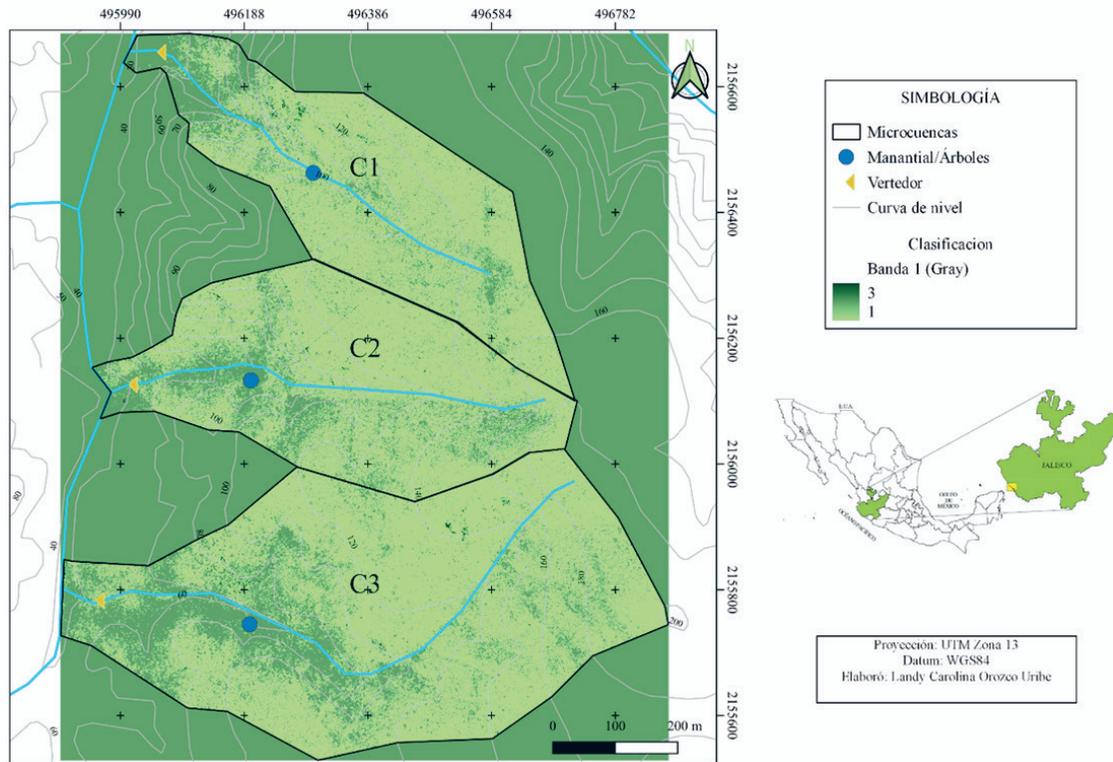
La medición del microdrenaje arrojó 756 líneas en plano con una distribución más equilibrada del fracturamiento. Nuevamente el rumbo NE - SO fue el más frecuente, junto con el rumbo NO - SE con un vector principal de 106,5° (figura 3C).

La primera respuesta lluvia-escurrimiento se presentó con una lámina de 39,6 mm el día 20 de julio con tres eventos previos acumulando 102,8 mm (figura 4A). Los hidrogramas individuales de las cuencas para el mismo día, mostraron diferencias en el comportamiento de los picos de lluvia y los del escurrimiento: 1) un desfase en el tiempo de respuesta, de 1 hora para la C1; de 3 horas para la C2; y de 8 horas para la C3 (figuras 4B a D); 2) el caudal máximo registrado, de 28, 24 y 34 m<sup>3</sup> hr<sup>-1</sup>, respectivamente; y 3) la generación y tiempo de duración del caudal base, el cual solo se manifestó en C2 y C3, siendo hasta cuatro veces mayor en la C3 con respecto a la C2 (áreas sombreadas en las figuras 4C y D). La descarga de agua subterránea se prolongó durante 6 y 38 días, respectivamente. La C1 solo presentó flujo directo (figura 4B). La separación de los hidrogramas permitió calcular el volumen de escurrimiento directo y el volumen base asociado a la descarga de agua subterránea (cuadro 2).

En C2 y C3 se observaron variaciones diarias del caudal base (figuras 4C y D) asociadas a la influencia de la evapotranspiración en condiciones de saturación, representando la zona de descarga ( $ET_D$ ). La variación del caudal base disminuyó progresivamente con el tiempo, por lo que los valores de  $ET_D$  fueron de 0,047 mm d<sup>-1</sup> a 0,010 mm d<sup>-1</sup> en la C2 y de 0,140 mm d<sup>-1</sup> a 0,067 mm d<sup>-1</sup> en la C3 para el periodo en el que se mantuvo el escurrimiento base.

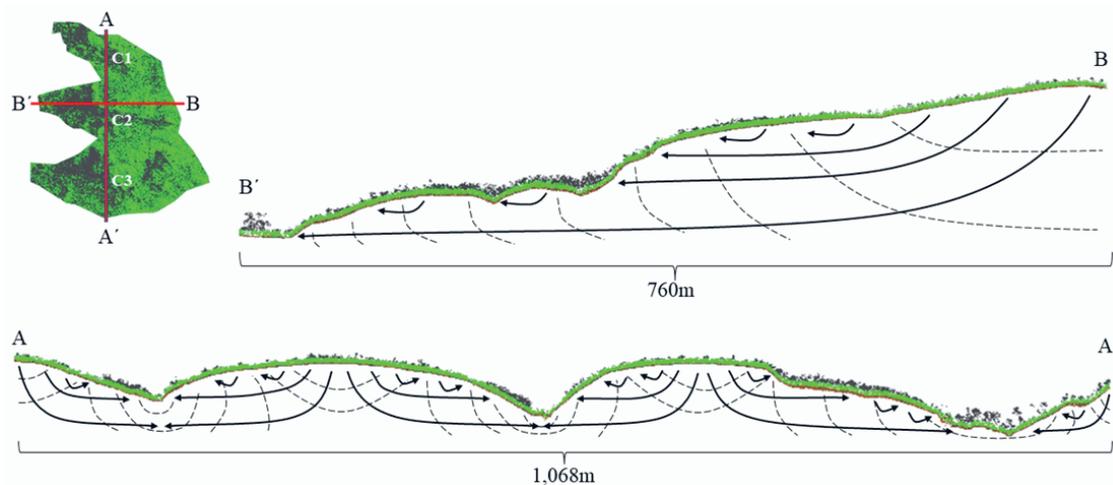
Las simulaciones numéricas de la distribución del contenido de humedad ( $\theta$ ) en el perfil de suelo un día después de la lluvia de 55,3 mm del 11 de julio, para los dos escenarios considerados mostraron que para 1)  $K_s = 1$  m d<sup>-1</sup>, se generó un incremento de hasta 17 % en los primeros 25 cm y una reducción progresiva a 50 cm, y para 2)  $K_s = 10$  m d<sup>-1</sup>, se tuvo un incremento de hasta 9 % en los primeros 85 cm del perfil (figura 5A). Los contenidos de humedad disminuyeron en los días siguientes.

La simulación del balance de agua en el espesor del suelo mostró que una  $K_s = 1$  m d<sup>-1</sup> retrasaría en un día o más el flujo de salida de agua en el dominio de flujo y lo limitaría a cierta profundidad; mientras que una  $K_s = 10$  m d<sup>-1</sup> permitiría una respuesta prácticamente inmediata en la infiltración a través del espesor de suelo. La proporción de la lámina de agua que ingresó y salió del



**Figura 1.** Ubicación de las cuencas y distribución de los tipos de vegetación a partir de la clasificación de la ortofoto LiDAR con resolución de 1 m. La banda 1 (verde claro) corresponde al BTC, la banda 2 (verde oscuro) al BTSC y la banda 3 (negro) a áreas sin vegetación (< 0,5 %). Destaca la distribución del BTSC en lineamientos. Se muestra también la localización de manantiales y árboles intolerantes, así como de los vertedores para el registro del escurrimiento.

Distribution of vegetation types within basins using the LiDAR orthophoto classification with a 1m resolution. Band 1 (light green) corresponds to TDF, band 2 (dark green) to STF and band 3 (black) to areas without vegetation (< 0.5%). The distribution of TDF is highlighted using lines. The locations of springs and intolerant trees are shown, as well as the outlets for recording runoff.



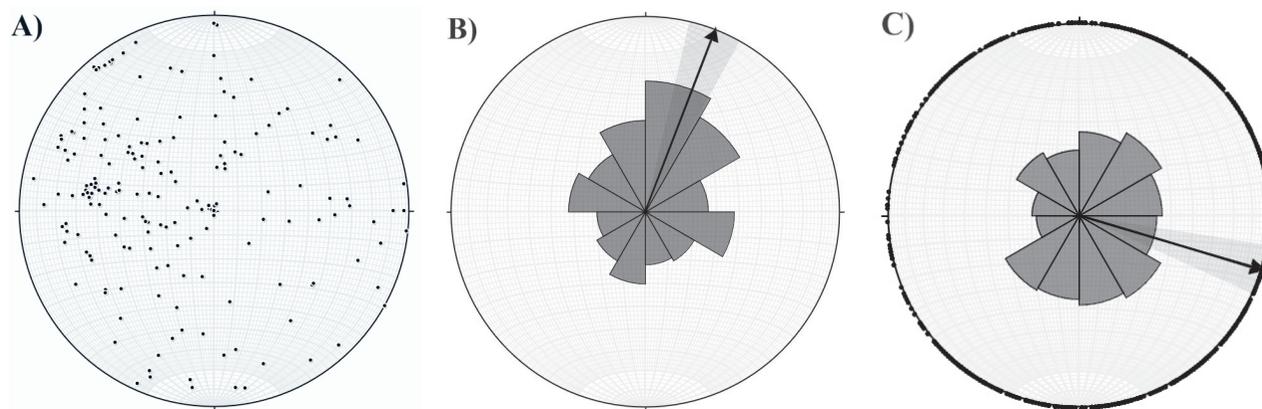
**Figura 2.** Posibles rutas de los flujos subterráneos al interior de las cuencas a partir de las evidencias superficiales de distribución de la vegetación y manantiales, las líneas punteadas representan equipotenciales. Los perfiles son reales obtenidos a partir de una imagen LiDAR, los puntos negros representan árboles con alturas superiores a 5 m.

Possible routes of subterranean flows towards the interior of the basins based on surface evidence of vegetation and spring distribution. Dotted lines represent equipotentials. The profiles are accurate, obtained using a LiDAR image, and the black dots represent trees with heights greater than 5 m.

**Cuadro 2.** Valores calculados de precipitación (P) recibida en cada cuenca por superficie para el evento del día 20 de julio (39,6mm). Valores medidos de escurrimiento total ( $Q_{tot}$ ) y calculados para escurrimiento directo ( $Q_D$ ) y base ( $Q_B$ ). El escurrimiento base en las C2 y C3 fue considerado en los cálculos.

Calculated values of precipitation (P) received in each basin according to its surface for the event on July 20 (39.6 mm). Measured values of total runoff ( $Q_{tot}$ ) and calculated values for direct runoff ( $Q_D$ ) and baseflow ( $Q_B$ ). Baseflow was considered in the calculations for C2 and C3.

Cuenca	Superficie(m <sup>2</sup> )	P (m <sup>3</sup> )	$Q_{tot}$ (m <sup>3</sup> )	$Q_D$ (m <sup>3</sup> )	$Q_B$ (m <sup>3</sup> )	% $Q_{tot}$	% $Q_D$	% $Q_B$
C1	149.100	5.904,36	101,50	101,50	0,00	1,72	1,72	0,00
C2	192.900	7.638,84	286,87	70,79	216,08	3,76	0,93	2,83
C3	280.300	11.099,88	3.085,04	194,41	2.890,63	27,79	1,75	26,04



**Figura 3.** A) Diagrama de polos obtenidos de las mediciones en campo, B) Roseta de fracturamiento obtenidos de las mediciones en campo y C) Roseta de líneas en plano obtenidas a partir del análisis del microdrenaje LiDAR.

A) Pole diagram obtained from field measurements. B) Fracture rosette obtained from field measurements. C) In-plane line rosette obtained from LiDAR microdrainage analysis.

suelo (% de infiltración hacia el medio fracturado) para la lluvia del 11 de julio (día 4) fue de 67 % y para la del 20 de julio (día 13) de 61 %; con la diferencia retenida como  $\theta$  (figura 5B).

La revisión exhaustiva de información previa publicada y la integración de todos los componentes analizados mostró que la dinámica hidrológica no está condicionada a dos temporadas (lluvias y secas) sino a cuatro: i) primavera seca (marzo a mayo), ii) inicio de lluvias (junio y julio), iii) lluvias (agosto a noviembre) e iv) invierno (diciembre a febrero), dadas las características fenológicas de la vegetación, la ocurrencia de eventos de precipitación, el proceso de humedecimiento y secado del suelo y la ocurrencia de eventos de escurrimiento. Por lo tanto, los factores asociados a la recarga y descarga de agua subterránea son variables (cuadro 3).

El índice de área foliar (IAF) indica la dinámica fenológica de la vegetación, los valores son un promedio del BTC y BTSC (Maass *et al.* 1995). La evapotranspiración corresponde al BTC, por lo tanto, se refiere a las zonas de recarga ( $ET_R$ ) (Barradas y Fanjul 1985, Burgos 1999). La interceptación del dosel ( $I_n$ ) varía a lo largo del año dependiendo del volumen e intensidad de la precipitación y la dinámica del follaje, siendo agosto y septiembre los

meses con un mayor valor (Burgos 1999, Cervantes Servin 1988); las lluvias por debajo de 10 mm suelen ser interceptadas casi en su totalidad (Maass *et al.* 2002). La interceptación por la hojarasca ( $I_n$ ) es mayor en mayo, coincidiendo con el pico de su acumulación (Burgos 1999). El valor para el flujo caudal ( $F_c$ ) es relativamente estable debido a la misma estabilidad anual en las estructuras de la vegetación que intervienen (ramas y troncos) (Cervantes Servin 1988). La infiltración (IN) fue derivada de los valores obtenidos por el autor consultado mediante el análisis de hidrogramas unitarios (López-Guerrero 1992).

Aplicando los valores del cuadro 3 en los balances hídricos mensuales para las cuatro temporadas con datos de largo plazo, encontramos resultados de almacenamiento (S) positivos también variables (figuras 6A - D).

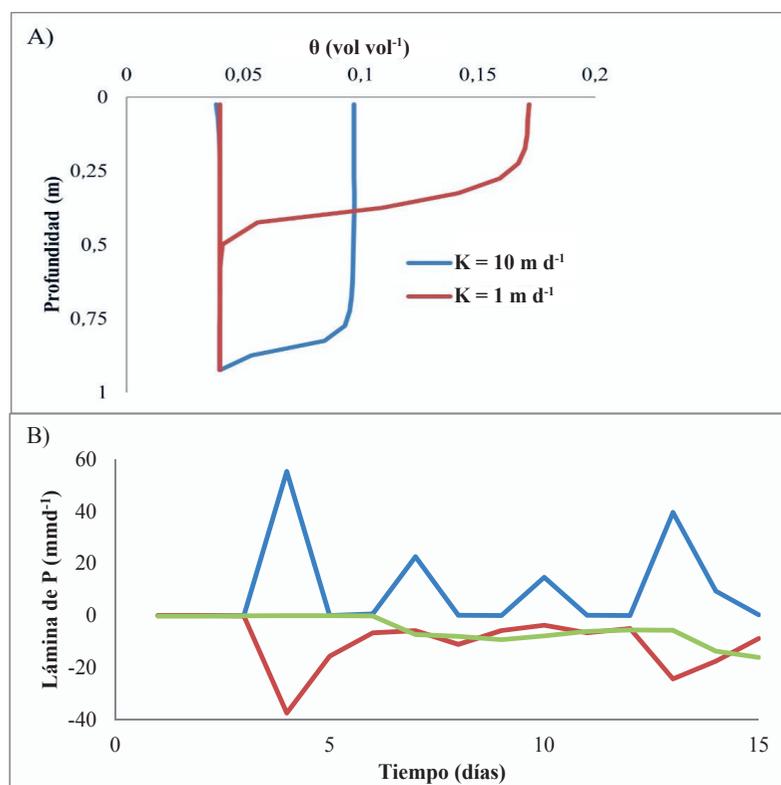
## DISCUSIÓN

Existe una asociación entre los tipos de vegetación, el patrón de fracturamiento y el escurrimiento de agua en las microcuencas con base en el análisis LiDAR. La distribución del BTSC, además de presentarse en las zonas bajas de descarga, también se asocia a lineamientos geológicos en zonas intermedias de las microcuencas como vegeta-



**Figura 4.** A) Hidrograma del mes de julio de 2019 para las tres microcuencas de estudio; se observan tres eventos de precipitación importantes previos al escurrimiento: 11 de julio (55,3 mm), 14 de julio (22,6 mm) y 17 de julio (14,7 mm) y el evento de precipitación que reporta escurrimiento: 20 de julio (39,6 mm). B-D) Hidrogramas individuales horarios del 20 al 31 de julio de 2019. En C2 (C) y C3 (D) se observa la formación de flujos base relacionados al aporte de agua subterránea, así como las fluctuaciones diarias asociadas a la evapotranspiración en la zona de descarga (ET<sub>D</sub>).

A) General hydrograph of July 2019 for the three microbasins. Three major precipitation events prior to the occurrence of the runoff are observed: July 11 (55.3 mm), July 14 (22.6 mm), and July 17 (14.7 mm), along with the precipitation event that triggered the runoff: July 20 (39.6 mm). B-D) Hourly individual hydrographs from July 20 to 31, 2019. In C2 (C) and C3 (D), the formation of baseflow related to groundwater supply and daily fluctuations associated with evapotranspiration of the discharge zone (ET<sub>D</sub>) are observed.



**Figura 5.** A) Resultado de las simulaciones mostrando la distribución del contenido de humedad ( $\theta$ ) en el perfil de suelo. B) Análisis numérico en condiciones no saturadas para el suelo arenoso. Lámina de infiltración en la superficie del suelo (línea azul) y lámina que ingresaría hacia el medio fracturado subyacente con una  $K_s = 1 \text{ m d}^{-1}$  (línea verde) y una  $K_s = 10 \text{ m d}^{-1}$  (línea roja).

A) Results of the simulations showing the distribution of moisture content ( $\theta$ ) in the soil profile. B) Numerical analysis under unsaturated conditions for sandy soil. Infiltration sheet in the soil surface (blue line) and infiltration sheet that would enter the underlying fractured medium with a  $K_s = 1 \text{ m d}^{-1}$  (green line) and a  $K_s = 10 \text{ m d}^{-1}$  (red line).

**Cuadro 3.** Variabilidad calculada de los factores relacionados a la vegetación y el suelo en la dinámica hidrológica por cada temporada. Los datos fueron derivados a partir de la revisión de distintas publicaciones. IAF: Índice de Área Foliar, ET: Evapotranspiración,  $In_d$ : Interceptación por el dosel,  $In_h$ : Interceptación por la hojarasca, Fc: Flujo caulinar, IN: Infiltración.

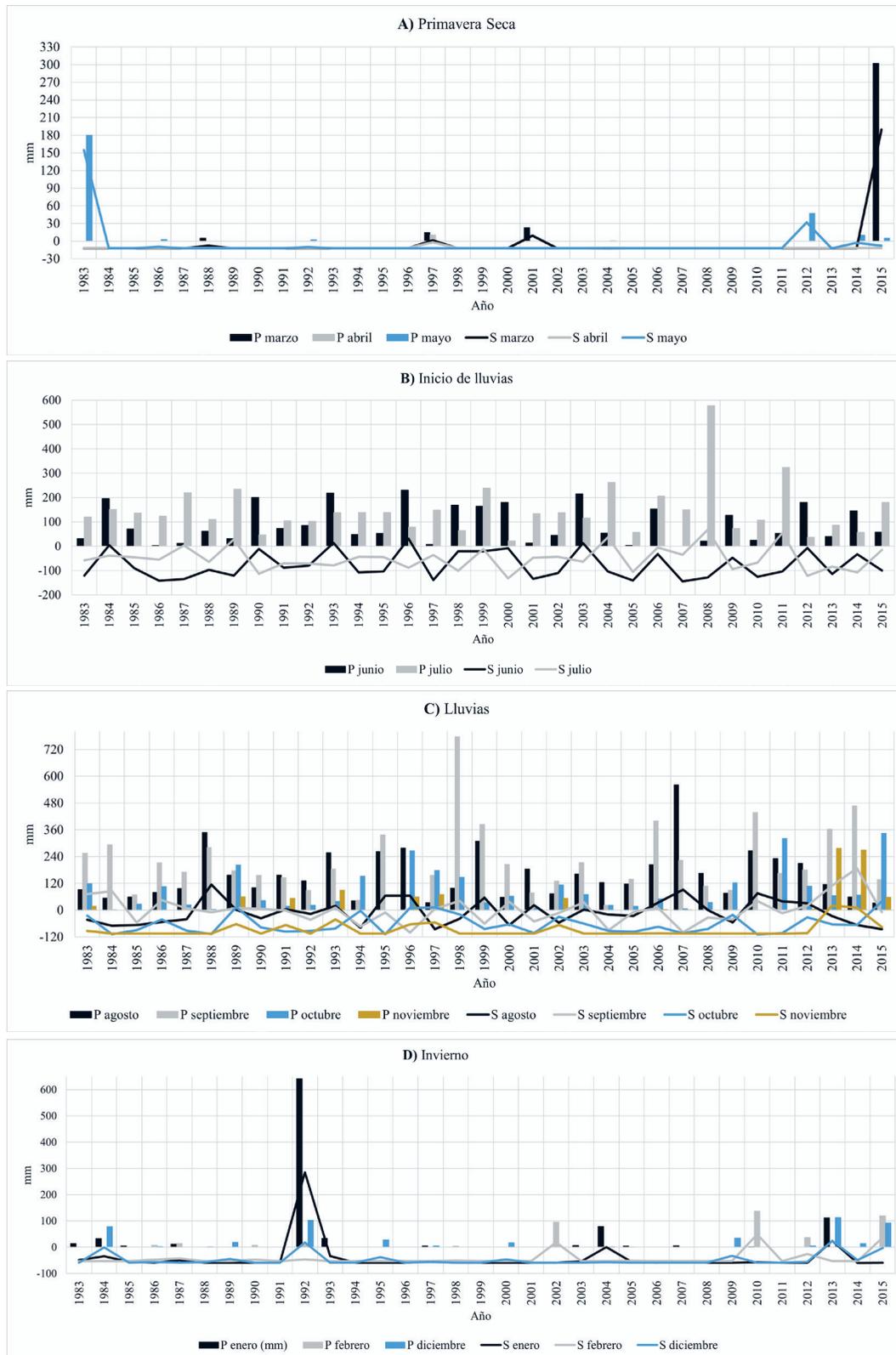
Variability of factors related to the vegetation and soil in hydrological dynamics for each season, calculated based on data from various publications. IAF: Leaf Area Index, ET: Evapotranspiration,  $In_d$ : Canopy interception,  $In_h$ : Litter interception, Fc: Stemflow, IN: Infiltration.

Temporada	IAF (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )	ET (mm d <sup>-1</sup> )	$In_d$ (%)	$In_h$ (mm)	Fc (%)	IN (mm 15min <sup>-1</sup> )
Primavera seca	1,0	0,6	7,64	1,53	5,2	29,06
Inicio de lluvias	2,5	3,2	18,50	1,33	5,2	13,14
Lluvias	4,7	3,8	23,10	0,80	5,2	5,77
Invierno	2,6	1,7	19,30	1,07	5,2	13,14

ción azonal (Fan 2015), en donde probablemente el potencial hídrico es mayor a -1,2 MPa (Méndez-Alonzo *et al.* 2013). Esta vegetación azonal y la presencia de manantiales sustentan lo anterior, coincidiendo principalmente con la familia de fracturas con rumbos SE - NO.

Los valores de evapotranspiración para las zonas de recarga ( $ET_R$ ) son los únicos disponibles para el área y

se limitan a los años de estudio y especies particulares de cada fuente de información; estimamos que el trabajo de los autores consultados es robusto, ya que los factores mensuales son similares y complementarios. La evapotranspiración calculada para las zonas de descarga ( $ET_D$ ), correspondiente al BTSC, representa aquella del inicio de la época de lluvias, reflejando probablemente el escenario



**Figura 6.** Almacenamientos (S) calculados por temporada A) Primavera seca, B) Inicio de lluvias, C) Lluvias, D) Invierno; integrando las tres microcuencas y aplicando el modelo conceptual. Se observan almacenamientos positivos en distintos momentos del año, con el máximo calculado para el mes de enero (invierno) del año 1992.

Calculated storages (S) by season A) Dry spring, B) Onset of rains, C) Rainfall, D) Winter. The calculations integrate data from the three microbasins using the conceptual model. Positive storage values are observed at different times of the year, with the maximum calculated for the month of January (winter) in 1992.

de máxima  $ET_D$  en este bosque, con algunas reducciones en la primavera seca cuando especies realizan recambio de hojas (Bullock 2002). En general, los valores de ET son bajos, probablemente debido a las estrategias de la vegetación para evitar la pérdida de agua en un ambiente extremo; como son la pérdida de hojas y el control estomático (Barradas y Fanjul 1985, Fanjul y Barradas 1987, Burgos 1999, Huante *et al.* 2002)

En Chamela la mayor parte de los eventos de precipitación son nocturnos, menores a 20 mm y de baja intensidad (Maass *et al.* 2018); por lo tanto, la demanda evapotranspirativa es mínima y una fracción importante de la precipitación es interceptada, por lo que los análisis y cálculos de ET requieren un mayor abordaje en especies representativas de las estrategias funcionales.

Los hidrogramas muestran que la dinámica de escurrimiento es muy rápida en respuesta a la lluvia, con la formación de flujo base, cuestión que no había sido analizada anteriormente. Las microcuencas muestran una respuesta diferenciada a los mismos eventos de lluvia, probablemente relacionada con su superficie, la densidad y conectividad del fracturamiento, la cobertura de cada tipo de vegetación y suelo, inclinación topográfica y posición altitudinal de los cauces (Kirchner 2009, Poeter *et al.* 2020). Esto se sustenta en la formación de un flujo base de mayor duración y volumen en C3, en donde la inclinación topográfica y la posición altitudinal del cauce es menor respecto a C1 y C2 (perfil A-A').

Nuestra simulación de la zona no saturada del suelo indica que el escenario de  $K_s = 10 \text{ m d}^{-1}$  es la más consistente con el tiempo de respuesta de los hidrogramas. La presencia de macroporos en el suelo (Cotler *et al.* 2002) y la alta densidad del fracturamiento local con aperturas heterogéneas y ausencia de rellenos, sugieren una alta conductividad hidráulica del suelo y del medio fracturado, hasta de  $10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  o más (Freeze y Cherry 1979). Esto en su conjunto, permite el ingreso y movimiento rápido del agua hacia los horizontes profundos, explicando la rápida respuesta hacia la zona de descarga. Es así como el porcentaje de infiltración superficial, sustrayendo el valor de interceptación, rondaría entre el 84 y 86 % de la precipitación.

La respuesta hidrológica puede resumirse entonces en dos componentes principales: 1) una zona amplia donde se lleva a cabo la infiltración del agua de lluvia a través de la delgada y porosa capa de suelo hacia el medio fracturado, y 2) una zona de descarga de agua subterránea limitada a una franja adyacente a los arroyos principales que se manifiesta como caudal base en su salida (Freeze y Cherry 1979, Poeter *et al.* 2020).

El flujo en el medio fracturado en la zona de estudio es difícil de analizar debido a que este ocurre a lo largo de fracturas discretas, cuya distribución y propiedades son desconocidas. A pesar de la exhaustiva caracterización de fracturas en campo y lineamientos de micro drenaje, no es posible conocer el comportamiento de aquellos que contienen agua y en particular en fracturas con aperturas y

longitudes mayores con flujo turbulento donde la ley de Darcy no aplica.

El flujo en las fracturas también puede ser controlado por el desarrollo y penetración de raíces leñosas a profundidades superiores a 2 m o por relleno de raíces finas; lo que daría lugar a una mayor complejidad en la respuesta y permanencia de los niveles de agua en su interior. Los árboles tolerantes mantienen sus hojas por mayor tiempo (Markesteyn y Poorter 2009, Pineda-García *et al.* 2015), indicando una posible sustracción de agua más profunda respecto a otras especies o la presencia de un nivel de agua cercano a la superficie (Borchert 1994, Poeter *et al.* 2020), tal es el caso del guayabillo (*Piranhea mexicana* (Standl.) Radcl.-Sm.), cuya distribución coincide con los puntos intermedios de las microcuencas y en lineamientos geológicos. El efecto del crecimiento de las raíces y de su actividad-efecto bioquímico al interior de las fracturas es un tema pendiente de investigación.

Nuestro modelo conceptual considera las cuatro temporadas identificadas y la variabilidad en el proceso de recarga y descarga de agua subterránea (cuadro 4 y figura 7).

En Chamela se requiere un acumulado de precipitación superior a 200 mm mensuales para que ocurran eventos significativos de escurrimiento (Maass *et al.* 2018). Estudios en otras regiones con regímenes estacionales similares, han demostrado que la recarga sustentable de agua subterránea ocurre en eventos individuales de lluvia (van Wyk *et al.* 2012, Farrick y Branfireun 2015). Nuestro análisis a una escala más detallada utilizando los datos de largo plazo muestra que en efecto, no solo el volumen y continuidad de los eventos de precipitación inciden en la ocurrencia de escurrimientos con flujo base, sino también las condiciones fenológicas de la vegetación y del suelo. Si aunamos la tendencia al incremento de la precipitación relacionado al cambio climático, principalmente durante los meses invernales (Maass *et al.* 2018, Takano-Rojas *et al.* 2023), es probable que el almacenamiento de agua en las microcuencas también aumente. Es así como la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias parecen ser claves en el proceso de recarga y descarga en estos ecosistemas.

## CONCLUSIONES

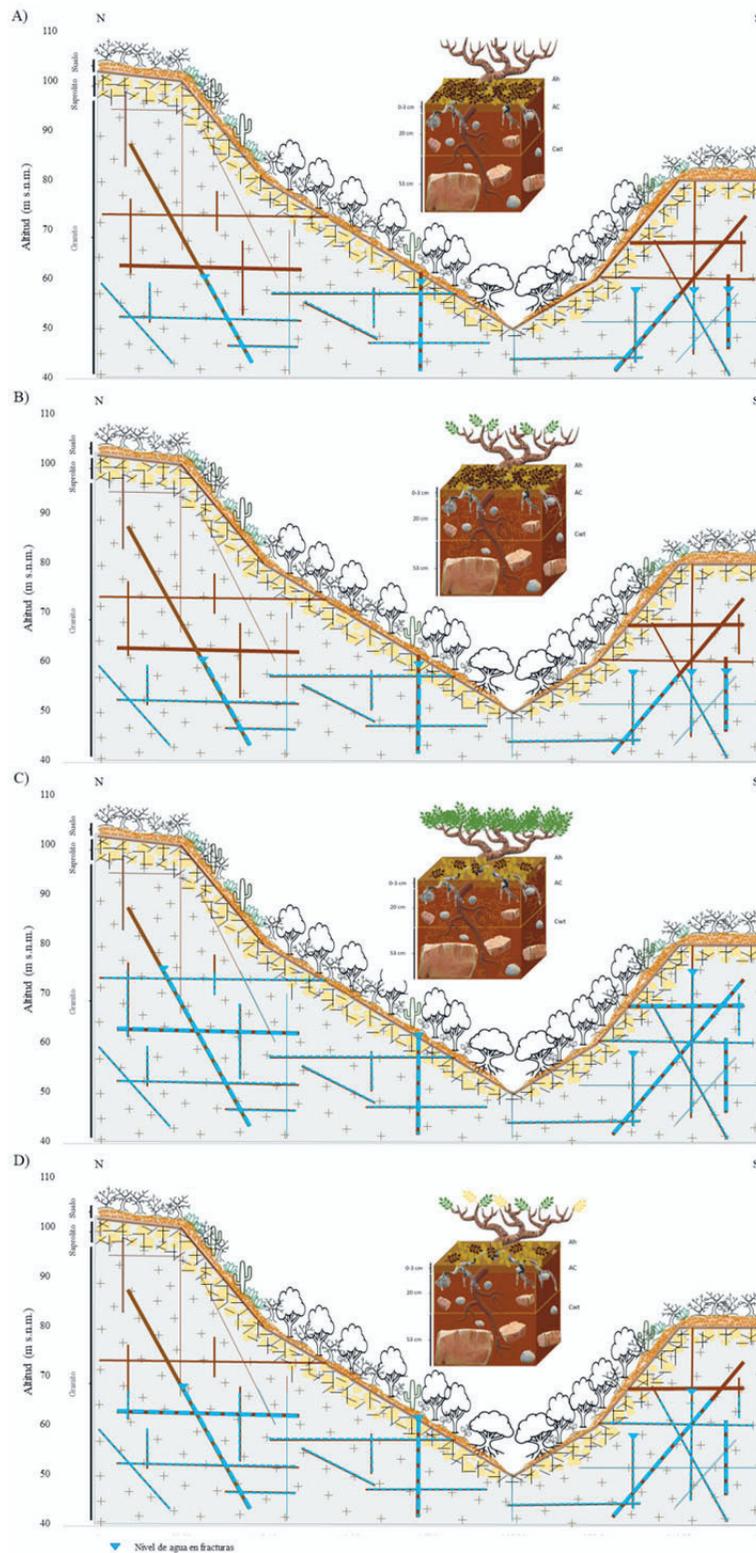
El amplio conocimiento del medio físico y biótico en la zona de estudio, de más de 40 años, en complemento con la caracterización del medio fracturado, la toma de datos en campo y el análisis de imágenes LiDAR, la precipitación e hidrogramas característicos del comienzo de los escurrimientos, nos permite integrar y proponer un modelo conceptual de la respuesta ecosistémica a los cambios estacionales relacionándola a la recarga y descarga de agua subterránea. Este modelo es un medio económico y continuo que puede ser utilizado como base en otros sistemas estacionales que se desarrollan sobre medios geológicos fracturados.

Anteriormente se consideraba que la infiltración profunda en las microcuencas de estudio sería prácticamente

**Cuadro 4.** Consideraciones cualitativas de las condiciones fenológicas de la vegetación y el suelo con afectación a los factores de la dinámica hidrológica. P: precipitación, ET: evapotranspiración, In: interceptación, IN: infiltración, q: humedad del suelo, Q: escurrimiento.

Qualitative considerations of phenological conditions in vegetation and soil influencing hydrological dynamic factors. P: precipitation, ET: evapotranspiration, In: interception, IN: infiltration, q: soil moisture, Q: runoff.

Temporada	P	ET	In	IN	q	Q	Agua en fracturas
Primavera seca (marzo-mayo) Figura 7A	Prácticamente nula.	Mínima: BTC sin hojas. BTSC recambia hojas.	Mínima, por hojarasca y estructuras vegetativas.	Máxima, poros abiertos.	Suelo sin agua disponible para las plantas.	Sólo en eventos extraordinarios que superen la infiltración.	Nivel mínimo.
Inicio de lluvias (junio-julio) Figura 7B	Eventos convectivos o ciclónicos.	Intermedia: BTC con rebrote de hojas. BTSC recambia hojas.	Intermedia, por rebrote de hojas en BTC.	Intermedia, por crecimiento de raíces finas.	Inicia el mojado por horizontes superficiales.	Aparición por eventos continuos de P o de intensidad moderada.	Nivel intermedio, con posibilidad de formación de flujos base.
Lluvias (agosto-noviembre) Figura 7C	Eventos continuos principalmente ciclónicos.	Máxima: BTC y BTSC con desarrollo completo de dosel.	Máxima por dosel. Hojarasca mojada y en descomposición.	Mínima, crecimiento máximo de raíces y colapso de poros.	Suelo completamente mojado.	Mayor ocurrencia de eventos.	Nivel intermedio a máximo produciendo flujos base.
Invierno (diciembre-febrero) Figura 7D	Disminuye considerablemente.	Intermedia por inicio en la pérdida de hojas en BTC.	Intermedia por acumulación de hojarasca.	Intermedia por muerte y descomposición de raíces finas.	Suelo en proceso de secado.	Solo en eventos extraordinarios que superen la infiltración.	Nivel intermedio, con posibilidad de formación de flujos base.



**Figura 7.** Modelo conceptual presentando las condiciones sistémicas de las cuencas en las cuales se desarrolla la dinámica hidrológica. A) Primavera seca, B) Inicio de lluvias, C) Lluvias y D) Invierno.

Conceptual model illustrating the systemic conditions of the basins where hydrological dynamics occur during A) Dry spring, B) Onset of rains, C) Rains and D) Winter.

nula debido al basamento granítico y a la fuerte demanda atmosférica de humedad. Sin embargo, las evidencias de nuestro estudio indican que: 1) la recarga de agua subterránea es mayor a la que se había considerado con anterioridad relacionada al fracturamiento del granito; 2) la  $ET_R$  debe ser del orden de  $1 \text{ mm d}^{-1}$ , en consistencia con el tiempo de respuesta y volumen de agua subterránea ( $Q_B$ ) medido en la zona de descarga; y 3) estas respuestas, indican la importancia de la rapidez y magnitud de la recarga asociada a eventos individuales de precipitación y al estado fenológico de la vegetación y suelos en su movimiento, también rápido, hacia el medio fracturado.

El modelo conceptual considera la dinámica hidrológica estacional en suelos delgados ( $\leq 1 \text{ m}$ ) con alta porosidad y un medio geológico fracturado subyacente. La sección transversal es representativa de las cuencas, donde sus límites representan la posición del parteaguas superficial que coincide con el subterráneo. Se representa el granito fracturado que se extiende a profundidad, con macro y microfracturas interconectadas que permiten la circulación del agua a través de ellas, tal como lo sugiere la respuesta del caudal base en los hidrogramas. Los tipos de vegetación representativos de la superficie cumbral y laderas se incluyen esquemáticamente.

Se definen cuatro temporadas: 1) Primavera seca (marzo - mayo); 2) Inicio de lluvias (junio y julio); 3) Lluvias (agosto - noviembre); y 4) Invierno (diciembre - febrero). Las características generales de cada temporada se refieren a la ocurrencia de eventos de precipitación, fenología y condiciones de los suelos. La respuesta en la recarga se manifiesta en las variaciones del nivel de agua en las fracturas dentro del medio geológico en dos posiciones extremas, la primera más profunda en la temporada más seca (marzo-mayo) y la segunda en su posición más elevada asociada a la temporada de lluvias (junio - octubre).

El flujo de agua en el interior de la roca granítica ocurre a lo largo de fracturas discretas, con una densidad local muy alta y con gran variedad de aperturas y ausencia de rellenos. Su distribución, propiedades y conexión con el suelo permiten la rápida infiltración del agua de lluvia, que se manifiesta en las respuestas temporales del caudal base. El desarrollo y penetración de raíces leñosas y finas obstruirían parcialmente la continuidad del flujo y la respuesta y permanencia de los niveles de agua al interior de las fracturas.

El vasto conocimiento previo de la zona de estudio, gracias al interés continuado de un número considerable de investigadores y al establecimiento de proyectos de largo plazo (LTER) son fundamentales para este trabajo. Aunque sin duda se requiere aún el complemento de otras técnicas físicas, químicas y biológicas para reforzar el modelo conceptual, su desarrollo basado en la información de largo plazo se plantea como una poderosa herramienta que lleva a una aplicación “contexto - dependiente” que, sin este conocimiento, resulta muy general, lo que pone de manifiesto la necesidad de su existencia y continuidad.

Esto se traduce en una mejor toma de decisiones respecto al uso sostenible del agua por las comunidades humanas establecidas y por los interesados en la conservación de los ecosistemas naturales, los cuales están íntegramente asociados y adaptados a su dinámica hidrológica histórica.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

LCOU contribuyó con la revisión histórica de datos, el diseño experimental, toma de datos en campo, análisis LiDAR, de escurrimiento y de largo plazo. MAOG contribuyó con el diseño del análisis numérico de infiltración, su ejecución e interpretación y con el análisis de escurrimiento. MM contribuyó con la revisión histórica de datos, el diseño experimental y análisis de largo plazo. HP contribuyó con la revisión histórica de datos y el análisis de información ecofisiológica. Todos los autores contribuyeron en la redacción, discusión y revisión detallada del escrito.

## FINANCIAMIENTO

LCOU recibió apoyo de la beca de doctorado CONACYT número 861750/636083. Este proyecto contó con financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM con clave IG200519; así como el apoyo durante muchos años por parte de CONACYT (siendo el más reciente: PN-CONACYT-2017-1-5526) y por parte de la Fundación Packard a través de un apoyo de infraestructura al Dr. José Sarukhán.

## AGRADECIMIENTOS

A los investigadores y estudiantes que a lo largo de más de 40 años han generado información invaluable para la zona de estudio. Al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) del cual LCOU forma parte. HP y MM agradecen la Beca Sabática que recibieron por parte de la Dirección de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM. Los autores agradecen el invaluable apoyo técnico y en campo del Biól. Raúl Ahedo-Hernández y del Ing. Salvador Araiza.

## REFERENCIAS

- Barradas VL, L Fanjul. 1985. Equilibrio hídrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biotica* 10(2): 199-210.
- Borchert R. 1994. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology* 75(5): 1437-1449. DOI: <https://doi.org/10.2307/1937467>
- Bullock SH. 2002. La fenología de plantas en Chamela. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avenida eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 491-498
- Burgos A. 1999. Dinámica hidrológica del bosque tropical seco de Chamela, Jalisco, México. Tesis de Maestría en Cien-

- cias. México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 125 p.
- Cadot D, S Kampf, E Wohl. 2012. Effects of evapotranspiration on baseflow in a tropical headwater catchment. *Journal of Hydrology* 462-463: 4-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.060>
- Cervantes-Servín L, M Maass, R Domínguez-Mora. 1988. Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia. *Ingeniería Hidráulica en México* 3(1): 30-42.
- Cervantes-Servín L. 1988. Intercepción de lluvia por el dosel en una comunidad tropical. *Ingeniería Hidráulica en México* 3(2): 38-42.
- Clapp RB, GM Hornberger. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14(4): 601-604. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR014i004p0601>
- Cortés-Ávila FJ. 2001. Estudio geohidrológico de la subcuenca “Rio Cuitzmala”, en la costa de Jalisco. Tesis para Ingeniero Geólogo. México. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 118 p.
- Cotler H, E Durán, C Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avedaño eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 17-79.
- Duncan HP. 2019. Baseflow separation – A practical approach. *Journal of Hydrology* 575: 308-313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.040>
- Durán E. P Balvanera, EJ Lott, G Segura, A. Pérez-Jiménez, A Islas, M Franco. 2002. Estructura, composición y dinámica de la vegetación. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avedaño eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 443-472.
- Fan Y. 2015. Groundwater in the Earth’s critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes. *Water Resources Research* 51(5): 3052-3069. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017037>
- Fanjul L, VL Barradas. 1987. Diurnal and seasonal variation in the water relations of some deciduous and evergreen trees of a deciduous dry forest of the western coast of Mexico. *Journal of Applied Ecology* 24(1): 289-303. DOI: <https://doi.org/10.2307/2403805>
- Farrick KK, BA Branfireun. 2015. Flowpaths, source water contributions and water residence times in a Mexican tropical dry forest catchment. *Journal of Hydrology* 529: 854-865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.059>
- Freeze RA, JA Cherry. 1979. Groundwater (First Edit). New Jersey, EUA. Prentice-Hall Inc. 604 p.
- Gonzales AL, J Nonner, J Heijkers, S Uhlenbrook. 2009. Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(11): 2055-2068. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-13-2055-2009>
- Gupta SC, WE Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research* 15(6): 1633-1635. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01633>
- Healy RW. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the United States Geological Survey’s computer program VS2D: Denver Colorado, United States Geological Survey, Water Resources Investigations Report 90-4025. 125p.
- Huante P, VL Barradas, E Rincón. 2002. Ecofisiología vegetal. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avedaño eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 473-489.
- Kirchner JW. 2009. Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resources Research* 45(2). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR006912>
- López-Guerrero A. 1992. Escorrentía en pequeñas cuencas hidrológicas con selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. Tesis para Biólogo. México. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. 128 p.
- Maass JM, VJ Jaramillo, A Martínez-Yrizar, F García-Oliva, A Pérez-Jiménez, J Sarukhán. 2002. Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avedaño eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 525-542.
- Maass JM, J Vose, WT Swank, A Martínez-Yrizar. 1995. Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management* 74(1-3): 171-180. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03485-F](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03485-F)
- Maass M, R Ahedo-Hernández, S Araiza, A Verduzco, A Martínez-Yrizar, VJ Jaramillo, G Parker, F Pascual, G García-Méndez, J Sarukhán. 2018. Long-term (33 years) rainfall and runoff dynamics in a tropical dry forest ecosystem in western Mexico: Management implications under extreme hydrometeorological events. *Forest Ecology and Management* 426: 7-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.040>
- Markesteyn L, L Poorter. 2009. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance. *Journal of Ecology* 97(2): 311-325. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01466.x>
- Méndez-Alonzo R, F Pineda-García, H Paz, JA Rosell, ME Olson. 2013. Leaf phenology is associated with soil water availability and xylem traits in a tropical dry forest. *Trees* 27(3): 745-754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0829-x>
- Pineda-García F, H Paz, VC Meinzer, G Angeles. 2015. Exploiting water versus tolerating drought: Water-use strategies of trees in a secondary successional tropical dry forest. *Tree Physiology* 36(2): 208-217. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv124>
- Poeter E, Y Fan, J Cherry, W Wood, D Mackay. 2020. Groundwater in Our Water Cycle – getting to know Earth’s most important fresh water source. Ontario, Canada. The Groundwater Project. 136 p.
- Rentería-Rodríguez LY. 1997. Biomasa y almacenes de carbono radical en tres comunidades vegetales en la costa de Jalisco, México. México. Tesis para Biólogo. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 46 p.
- Rodríguez-Hernández R. 1999. Cartografía morfogenética jerárquica a tres escalas del área del microbloque “El Colorado” Chamela, Jalisco. México. Tesis para Geografía. Facultad

- de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. 136 p.
- Saldaña-Espejel A. 2008. Prioridades de restauración para la recuperación de servicios ecosistémicos asociados a los aspectos hidrológicos de la cuenca del río Cuitzmala, en el Pacífico Mexicano. México. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México. 149 p.
- Schaaf P. 2002. Geología y geofísica de la costa de Jalisco. In Noguera FA, JH Vega-Rivera, AN García-Aldrete, M Quesada-Avedaño eds. Historia Natural de Chamela. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 11-16.
- Singhal BBS, RP Gupta. 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Second Edition. Dordrecht, Holanda. Springer. 415 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9208-6>
- Siyum ZG. 2020. Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives. *Ecological Processes* 9: 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00229-6>
- Stan K, A Sanchez-Azofeifa. 2019. Tropical dry forest diversity, climatic response, and resilience in a changing climate. *Forests* 10(5): 443. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10050443>
- Sun G, JM Vose. 2016. Forest management challenges for sustaining water resources in the Anthropocene. *Forests* 7(3): 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/f7030068>
- Takano-Rojas H, G Murray-Tortarolo, M Maass, A Castillo. 2023. Characterization, variability and long-term trends on local climate in a Mexican tropical dry forest. *International Journal of Climatology* 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8133>
- Tóth J. 2016. The evolutionary concepts and practical utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow. *International Journal of Earth & Environmental Sciences* 1: 111. DOI: <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2016/111>
- van Wyk E, GJ van Tonder, D Vermeulen. 2012. Characteristics of local groundwater recharge cycles in South African semi-arid hard rock terrains: Rainfall-groundwater interaction. *Water SA* 38(5): 747-754. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i5.14>

Recibido: 23/01/23

Aceptado: 06/08/23

