

El páramo andino como productor y regulador del recurso agua. El caso de la microcuenca alta de la Quebrada Mixteque, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela

Mayanín Rodríguez-Morales¹,
Dimas Acevedo Novoa¹,
Wouter Buytaert², Magdiel Ablan³
y Bert De Bievre⁴

¹ Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Universidad de Los Andes, Venezuela

² Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, Inglaterra.

³ Centro de Simulación y Modelización, Universidad de Los Andes, Venezuela

⁴ Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, Ecuador.

Resumen

El páramo andino es reconocido como un importante proveedor y regulador de agua. De este recurso depende directamente la población paramera y sus actividades productivas, así como también otros usuarios aguas abajo. Buscando entender el funcionamiento hidrológico de los páramos venezolanos con miras de hacer un mejor manejo y gestión del recurso hídrico y con el objetivo de promover su conservación y la de sus servicios ambientales, se planteó esta investigación. Su objetivo es entender la relación entre las precipitaciones y drenaje superficial en una microcuenca paramera. Para ello se escogió el páramo de Mixteque, en donde se instaló una estación automatizada de caudal y una red de 13 pluviómetros artesanales y un pluviógrafo. Los registros abarcaron desde septiembre de 2008 a agosto de 2011. Las precipitaciones y los caudales fueron analizados a escala mensual, diaria y por eventos de precipitación. Se estimaron las relaciones entre caudal y precipitación mensual a escala de microcuenca. Se encontró que el caudal presentó un comportamiento similar al patrón de las precipitaciones. Sin embargo, la quebrada se mantuvo con flujo durante toda la estación seca. El caudal acumulado representó el 36% de los ingresos por precipitación. En la época húmeda, se observó un caudal muy dinámico fuertemente dependiente de la magnitud, la intensidad y frecuencia de los eventos de precipitación, que sugiriere poca capacidad de la regulación del páramo de Mixteque para amortiguar crecidas. Se observó que eventos de muy baja magnitud generaron incrementos de caudal. Sin embargo, el mantenimiento de los caudales en la época seca (meses en los que llueve muy poco o nada), indica que el páramo de Mixteque posee una capacidad de almacenamiento que mantiene un caudal base durante todo el año.

Palabras clave:

precipitaciones, escorrentía y regulación hídrica.

Abstract

The Andean paramo is widely recognized as an important provider and regulator of water availability. The paramo population and their productive activities as well as other downstream water users directly depend on this critical resource. This research was developed to contribute to our understanding of the hydrological functioning of the Venezuelan paramos as a mean to improve the management of water resources and to promote the conservation of its environmental services. The objective was to understand rainfall patterns and runoff in a paramo watershed. To this end, we chose the Mixteque paramo and installed one automatic discharge monitoring station, a network of 13 hand-operated pluviometers, and one automatic pluviograph. The data collection period extended from September 2008 to August 2011. Rainfall and catchment discharge were analyzed monthly, daily and for each precipitation event. The relationship between discharge and monthly rainfall was estimated at catchment scale. Our results show that discharge has a similar temporal pattern as rainfall. However, the Mixteque creek maintained a base flow during the whole dry season. Annual discharge represented 36% of the annual input by precipitation. During the wet season discharge was very dynamic, showing a strong dependence on the magnitude, intensity and frequency of rainfall events. This suggests a limited regulation capacity of this paramo for buffering peak flows. Rainfall events of limited magnitude also generated an increase in discharge. However, base flow is maintained during the dry season indicating that the storage capacity of the paramo system is significant

Keywords:

precipitations, escorrentía, water regulation

Introducción

La combinación de las características climáticas, geomorfológicas, edáficas y de vegetación del páramo hacen de este ecosistema una fuente permanente de agua de alta calidad (Vivas 1992). Es por esto que uno de los principales servicios ambientales que se le ha reconocido al páramo andino es ser proveedor del recurso agua.

En los páramos se produce una gran variedad de productos agrícolas exclusivos de ambientes fríos (Suárez 1978), que abastecen parte de las demandas nacionales de estos rubros (el estado Mérida en Venezuela, por dar un ejemplo, aporta el 51% de la producción nacional de papa). El crecimiento poblacional en los países con páramos ha traído consigo un aumento en las demandas nacionales de estos rubros. Esta situación ha generado la necesidad de incorporar nuevas áreas agrícolas, ha impulsado la intensificación del uso de la tierra del páramo (Monasterio 1980) y con ello el incremento de la demanda del recurso agua (Monasterio *et al.* 2006). Paradójicamente, las superficies agrícolas, demandantes de agua, están reduciendo progresivamente las áreas del páramo natural que almacenan, proveen y regulan la disponibilidad de este recurso a las primeras. En Venezuela, donde el 70,9% de los páramos se encuentran bajo figuras de protección (Josse *et al.* 2009), el avance de la frontera agrícola sobre los páramos ha conllevado a tasas anuales de pérdida considerables (Monasterio *et al.* 2006). La transformación de este ecosistema se evidencia estrechamente relacionada con la producción de papa. Estos procesos de transformación se vienen desarrollando sin el adecuado conocimiento del funcionamiento del páramo y de la potencialidad de sus recursos (Vivas 1992).

Por otra parte, el sistema productivo en los páramos venezolanos ha sido transformado, generando una mayor demanda de agua durante todo el año (Monasterio *et al.* 2006). Los cultivos de papa negra (un ciclo de cultivo anual) han sido reemplazados por la producción de la papa blanca (dos a tres ciclos anuales), además se han incorporado la utilización de agroquímicos, altas cantidades de abonos y nuevos cultivos resistentes a las heladas (como ajo y zana-horia), así como la instalación de sistemas de riego comunales y privados. En consecuencia, actualmente las áreas agrícolas del páramo venezolano son zonas de producción permanente (Monasterio 1980) que dependen constantemente del agua que proviene del páramo natural.

Otro factor que afecta los procesos de almacenamiento y regulación del recurso hídrico, ha sido indirectamente el proceso de intensificación de la agricultura, el cual ha generado cambios en los modelos de pastoreo y con ello una mayor presión e impacto del ganado sobre los páramos (Monasterio *et al.* 2006). El sistema agrícola tradicional, que se caracterizaba por dejar descansar la tierra (entre 3 hasta más de 12 años), permitía al ganado vacuno y equino pastorear en dichas parcelas durante los períodos de barbecho (Sarmiento y Monasterio 1993). A medida que se fue intensificando el sistema de producción, se fue eliminando la práctica del descanso, en consecuencia el ganado pastorea por más tiempo en las zonas más altas del páramo natural. Esto incrementa el impacto sobre este ecosistema, en especial sobre los humedales.

El cambio de uso de las tierras del páramo en combinación con la demanda creciente de agua, ha generado conflictos por el recurso hídrico (García 2006; Harden 2006; Buytaert *et al.* 2005; Molinillo y Monasterio 2005). Esto hace que sea necesario planificar el uso de las tierras del páramo y la optimización de la utilización del agua. Para ello, es necesario y fundamental el estudio de su hidrología, para poder soportar la toma de futuras decisiones (Buytaert *et al.* 2006a).

Debido a la dificultad de monitorear y a la escasez de datos de caudales de ríos pequeños de la alta montaña tropical, el conocimiento de cuanta agua pueden proveer los páramos es limitado. Los estudios hidrológicos de este ecosistema, han sido desarrollados principalmente en páramos de Ecuador y Colombia. El comportamiento hidrológico de estos páramos es diferente a los páramos venezolanos principalmente por dos razones. Primero porque los páramos venezolanos, a escala regional, son considerados como páramos secos (Hofstede 2003), con precipitaciones anuales entre 650 a 1.800 mm, con patrones que definen una marcada estacionalidad y la presencia de una época seca, que dura entre 4 a 5 meses, en la cual llueve poco o nada; en contraste, el clima de los páramos de Ecuador y Colombia es predominantemente más húmedo y con precipitaciones constantes durante todo el año (Buytaert *et al.* 2008b). Segundo, en Venezuela los suelos son minerales, esqueléticos, kándicos y ácidos de poco desarrollo pedogénico, predominantemente jóvenes (Entisoles e Inceptisoles), (Malagon 1982) y en Ecuador y Colombia la mayoría de sus suelos parameros son de origen volcánico o Andosoles (Buytaert *et al.* 2008a). Tales

características establecen marcadas diferencias entre estos páramos. Por tal razón, existe un vacío en el conocimiento hidrológico de los páramos venezolanos que no puede suplirse con los estudios desarrollados en Colombia y Ecuador. Sin embargo, Sarmiento (2000) hizo balances hídricos a escala de parcelas en el páramo de Gavidia suministrando alguna información clave durante dos años de monitoreo.

Por todo este conjunto de razones, el objetivo de la presente investigación fue caracterizar a escala de cuenca el comportamiento hidrológico de un páramo venezolano, a través del monitoreo continuo de las precipitaciones y el caudal en la microcuenca de la quebrada de Miguaguó en el páramo de Mixteque, con la finalidad de generar información base para la planificación y gestión ecohidrológica del páramo, con el fin último de soportar la toma participativa e integral de decisiones venideras. Además con el objetivo de resaltar la importancia de su conservación y la de sus servicios ambientales.

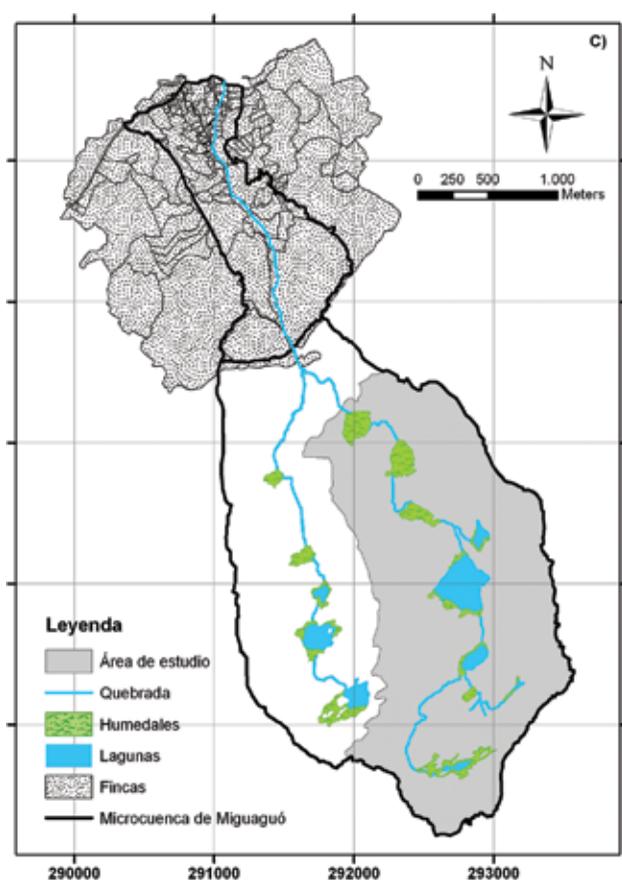
Metodología

Área de estudio

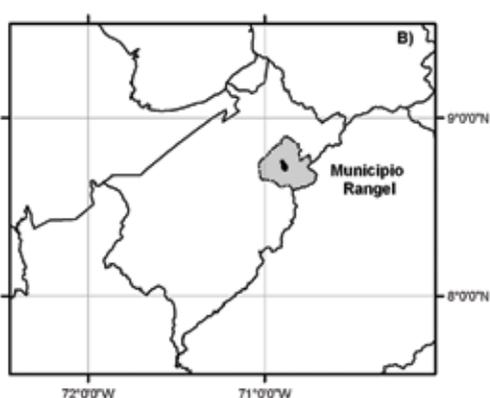
La microcuenca de la quebrada de Miguaguó, se localiza en el sector de Mixteque (8°44'N y 70°53'W), en la Parroquia Capital del Municipio Rangel del Estado Mérida (Figura 1b), sobre la Sierra Nevada de Mérida de Venezuela (Figura 1a), forma parte de la cuenca alta del río Chama y pertenece al Parque Nacional Sierra Nevada desde 1952. Posee una extensión de 7,4 km². Está conformada por dos valles fluvio-glaciales (un valle principal al este y un valle tributario al oeste) producto del modelado glacial relictual de la glaciación Mérida (Schubert y Vivas 1993).

Figura 1. **A)** Venezuela con Estado Mérida señalado en gris. **B)** Estado Mérida con el Municipio Rangel señalado en gris y la localización del área de estudio en negro. **C)** Microcuenca completa de la Quebrada Miguaguó, mostrando en color gris claro el área de estudio. En la zona sur de mapa se visualizan los linderos de las fincas del poblado de Mixteque.

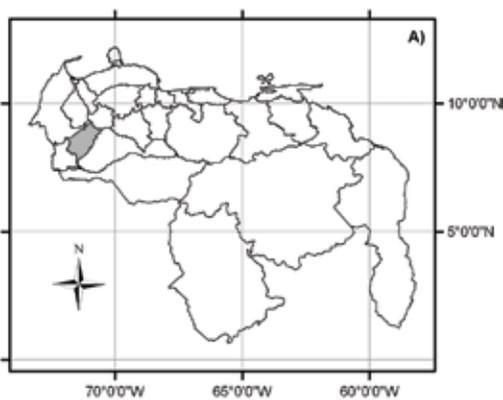
C. Microcuenca de Miguaguó



B. Estado de Mérida



A. Venezuela



La evaluación hidrológica se concentró sobre el valle principal con un área de 3,6 km² (Tabla 1), que representa el 49% de la microcuenca (Figura 1c). El área de estudio está sobre los 3.600 m de altitud, por encima de la frontera agrícola y con uso de pastoreo extensivo.

La hidrología está conformada por la quebrada de Miguaguó, la cual nace en el valle principal. Aguas abajo se le une una quebrada tributaria proveniente del valle oeste. Las quebradas integran un sistema interconectado de humedales en rosario, conformado por 8 lagunas y 10 humedales con céspedes y ciénagas (Figura 1c).

En su totalidad está cubierta por vegetación natural de páramo, conformada por arbustales-rosetales bajos, arbustales altos, humedales y bosques altoandinos. En la parte baja de la microcuenca se localiza la comunidad de Mixteque y la zona de agricultura intensiva (Figura 1c). Tanto la comunidad como sus actividades productivas dependen del agua proveniente del páramo para el consumo doméstico y riego.

Tabla 1. Características de la Microcuenca de Miguaguó

La superficie de las lagunas representan el 2% faltante de la cobertura y en la categoría de suelo desnudo se incluyen los afloramientos rocosos (18%) y manto de solifluxión (1%).

Cuenca Micro cuenca	Unidades	Chama Miguaguó
Área	km ²	3,6
Suelos		Inceptisoles, Entisoles
Cobertura vegetal	%	Arbustales-rosetales (64), Humedales (5), Suelos desnudos (19)
Uso del suelo		Parque Nacional Pastoreo extensivo
Geología		Asociación Grupo Iglesias: Gneis graníticos, esquistos y anfibolitas
Pendiente promedio	%	37
Altitud	msnm	3.600-4.010
Forma		N

El páramo andino como productor y regulador del recurso agua.

El caso de la microcuenca alta de la Quebrada Mixteque, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela.

Métodos

Desde septiembre de 2008 hasta agosto de 2011 se colectaron datos de precipitación en el valle derecho de la microcuenca. Se instaló una red de 13 pluviómetros manuales, a lo largo y ancho del área de estudio con la finalidad de evaluar la variabilidad espacial de las precipitaciones y calcular un mejor estimado de las entradas de agua a la microcuenca. En el fondo de valle de la parte media de la microcuenca se instaló una estación marca HOBO con un pluviógrafo (modelo S-RGB-Moo2) para llevar registros continuos cada 10 minutos.

Para este mismo periodo se recabaron datos de caudal. Debido a problemas técnicos existen tres interrupciones de los registros. Los lapsos con datos son: el primero entre septiembre de 2008 y marzo de 2009, el segundo entre octubre de 2009 y junio de 2010 y el tercero entre abril y agosto de 2011. Para el monitoreo de los caudales se construyó un vertedero triangular (90°) en el punto de salida o límite inferior del área de interés. Se instaló un limnógrafo (MiniDiver) en el vertedero y un barómetro (BaroDiver). Los instrumentos midieron cada 10 minutos. El caudal fue estimado con la fórmula de v-notch o de Kindsvater-Shen (Francou y Pouyaud 2004).

Para los análisis, las precipitaciones y los caudales fueron procesados mensualmente, diariamente y a escala de eventos. Para estimar las precipitaciones mensuales de la microcuenca completa, los datos pluviométricos fueron interpolados a toda el área con el método de IDW (Inverse Distance Weighting). Para el análisis de la respuesta del caudal versus eventos de precipitación, se consideraron los datos del pluviógrafo y se separaron los eventos. Un evento se consideró como toda precipitación con interrupciones menores a una hora. Se calculó la magnitud, intensidad y frecuencia de los eventos. Fueron seleccionados eventos de diferentes magnitudes e intensidades de acuerdo a la clasificación FAO (1990). Se escogieron 2 eventos

por clase en la época húmeda, uno con lluvias previas (menos de 4 horas del evento anterior) y otro sin precipitaciones antecedentes (más de 24 horas de separación del evento previo). La respuesta del caudal se estimó con la siguiente fórmula:

$$\% \Delta \text{ Caudal} = \frac{QP - QB}{QB} \times 100\%$$

Donde: % Δ Caudal es la variación porcentual del caudal; QP es el caudal pico y QB es el caudal base.

El QP se halló seleccionando el caudal máximo registrado entre el inicio del evento hasta una hora después de finalizado el mismo. Se escogió una hora como tiempo de retardo, según el tiempo de respuesta observado en los registros. El QB se estimó promediando los caudales registrados 30 minutos antes del inicio del evento.

Para el análisis mensual de la relación caudal versus precipitaciones, los meses de registros fueron separados en meses secos y húmedos siguiendo los criterios de los climadiagramas de Gaussen. Los meses de transición correspondieron a los meses previos o posteriores a los meses secos.

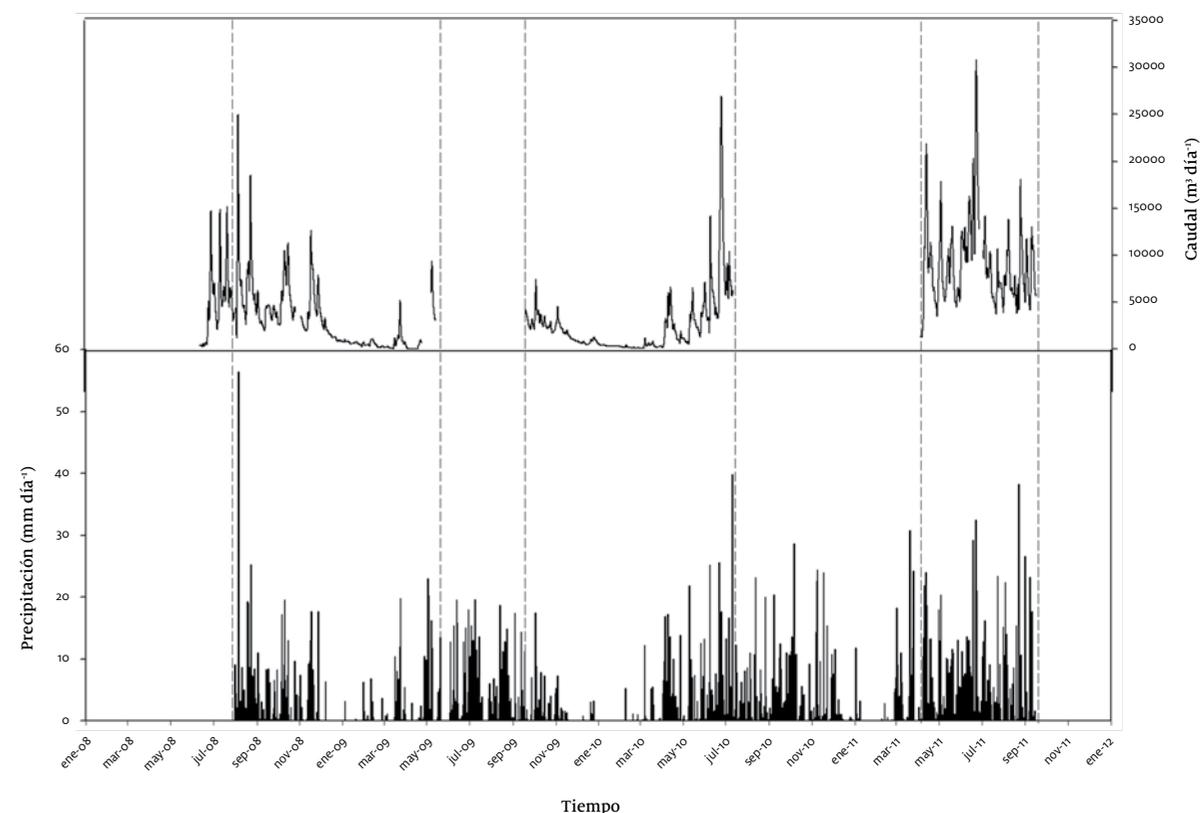
Adicionalmente, se levantó el mapa de geomorfología del área de estudio a través de la digitalización sobre pantalla de una foto área del año 1989. Por otra parte, se midió, en los suelos de las tres unidades geomorfológicas más representativas de la microcuenca (till sobre laderas, till sobre fondos de valles y humedales), la textura, conductividad hidráulica en saturación y otras variables relacionadas con el comportamiento hídrico. Además, se monitoreó el contenido de agua edáfica en los primeros 10 cm de profundidad en los suelos de estas unidades con el uso de TDRs marca HOBO, desde septiembre de 2008 hasta marzo de 2009.

Resultados

La precipitación promedio anual de la microcuenca fue 1.170 ± 125 mm (promedio de los años 2009 y 2010). Las precipitaciones presentaron un régimen unimodal con una marcada estacionalidad de dos a tres meses secos (diciembre, enero y febrero), con precipitaciones promedio de solamente 7 mm (Figuras 2 y 3a). Durante los meses lluviosos la precipitación mensual osciló entre 80 mm y 210 mm mensuales, con un promedio de 145 mm y con un pico de lluvias en el mes junio. La transición húmeda-seca fue en el mes de noviembre y de la transición seca-húmeda ocurrió en el mes de febrero o marzo.

Figura 2. **Precipitaciones (mm) y caudales (m³) diarios del Páramo de Mixteque entre septiembre de 2008 y agosto de 2011.**

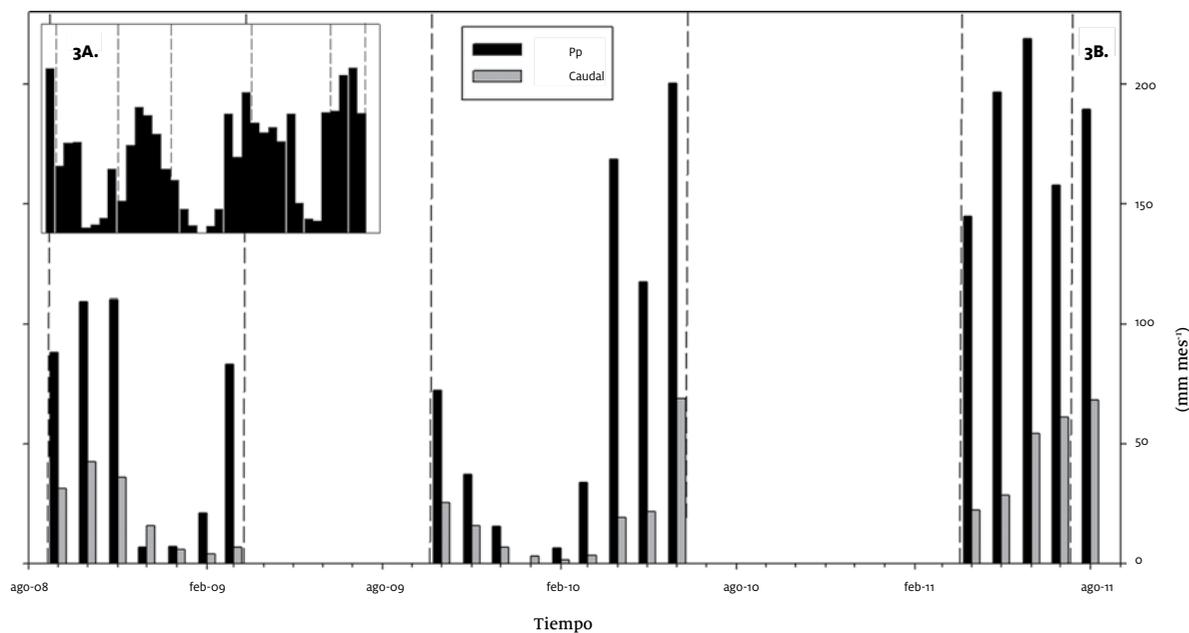
Las líneas punteadas indican los periodos de medición exitosa de ambas variables.



Al analizar la precipitación versus los caudales diarios (Figura 2) se encontró que durante la época húmeda el comportamiento del drenaje superficial se correspondió con la precipitación, es decir, se observó una respuesta proporcional del caudal con los eventos de precipitación y un descenso del mismo después de varios días sin o con pocas precipitaciones. A pesar de este comportamiento, durante la transición de la época húmeda a la seca el caudal disminuyó paulatinamente.

Figura 3A. **Precipitación mensual en la microcuenca del Páramo de Mixteque para el periodo completo de estudio.**

Figura 3B. **Comparación entre las precipitaciones y caudales mensuales en el área de estudio.**



Durante los meses secos el caudal base se mantuvo bajo, pero permanente con un valor de 1,4 l/s/km² (promedio de los meses secos). El 2010 correspondió a un año particularmente seco, con una marcada época de sequía que comenzó a finales de octubre de 2009 y finalizó a comienzos de mayo de 2010, durante la cual, en el mes de enero no se registraron precipitaciones. Sin embargo, el caudal se mantuvo. Durante este periodo de sequía se registró el caudal mínimo de todo el tiempo de estudio,

cuyo valor fue de 0,31 l/s/km² (Tabla 2). Por otra parte, se observó un incremento paulatino del caudal con el aumento de las precipitaciones en la transición de la época seca a la húmeda (Figura 2). Durante los meses lluviosos, cuando las precipitaciones fueron de mayores magnitudes y frecuencia, el caudal base se mantuvo alto, con valores mayores a 12,5 l/s/km² en los meses de mayo a septiembre de 2011. El caudal máximo registrado en el periodo de estudio fue de 98,8 l/s/km².

Tabla 2. **Características hidrometeorológicas y coeficiente de escorrentía de la microcuenca de estudio.**

Coefficiente de escorrentía estimado a partir del volumen acumulado del periodo completo de estudio.

Microcuenca	Unidades	Miguaguó (Mixteque)
Características hidrometeorológicas		
Inicio periodo monitoreo	Fecha	01/08/08 ^a
Final periodo monitoreo	Fecha	30/08/11
Caudal máximo	l/s/km ²	98,7
Caudal mínimo	l/s/km ²	0,3
Caudal promedio	l/s/km ²	13,4
Componentes del balance hídrico		
Inicio periodo balance	Fecha	01/08/08
Final periodo balance	Fecha	30/03/09
Precipitación	mm/año	1.101
Coefficiente de escorrentía		0,36

^a Vacíos de información de caudal entre 15/05/09 – 18/09/09 y 12/07/10 – 03/04/11

Este comportamiento del caudal ligado a la variación de las precipitaciones, se reafirma en las Tablas 3 y 4, en las cuales se analizaron eventos de precipitación de diferentes magnitudes, intensidades, con y sin eventos previos versus la variación del caudal. En dicho análisis se encontró que la respuesta del caudal incrementó

correspondientemente con la magnitud e intensidad de las precipitaciones, presentando una alta relación con la magnitud ($R_2=0,88$) y menor con la intensidad ($R_2=0,59$). Se hallaron incrementos del caudal inclusive para eventos tenues ($\leq 1\text{mm}$), a pesar de la muy baja magnitud de estas precipitaciones. La respuesta del caudal,

Tabla 3. **Respuesta del caudal frente a eventos de magnitud variable, en condiciones contrastantes de humedad previa del suelo (con y sin eventos previos de precipitación).**

Las siglas QB significan caudal base y QP caudal pico.

Categoría magnitud	Condición previa	Magnitud (mm)	Intensidad (mm/h)	Tiempo evento anterior (h)	QB (l/s)	QP (l/s)	% incremento de Caudal	Δ Caudal neto (l/s)
Tenua (< 1mm)	Previa lluvia	0,8	2,4	5,5	105,5	114,0	8,1	8,6
Tenua (< 1mm)	Sin lluvia previa	1	3	39,8	51,6	56,4	9,3	4,8
Muy ligero (1 - 3 mm)	Previa lluvia	2,6	3,9	3,7	130,9	172,8	32,0	41,9
Muy ligero (1 - 3 mm)	Sin lluvia previa	2,2	3,3	81,6	55,7	73,7	32,5	18,1
Ligero (3 - 10 mm)	Previa lluvia	7	2,8	6	53,7	159,5	197,0	105,8
Ligero (3 - 10 mm)	Sin lluvia previa	7,2	2,5	50,3	88,7	164,2	85,0	75,4
Moderado (10 - 40 mm)	Previa lluvia	18,8	4,3	1,7	106,9	483,7	352,6	376,8
Moderado (10 - 40 mm)	Sin lluvia previa	19,2	5,2	62,2	31,5	234,7	646,1	203,3
Fuerte (> 40 mm)	Previa lluvia	56	5,5	1,7	32,9	568,5	1630,4	535,6
Fuerte (> 40 mm)	Sin lluvia previa						Condición no monitoreada	

además, fue influenciada por la frecuencia de las lluvias, hallándose mayores variaciones del drenaje superficial cuando a los eventos examinados les precedió otro evento (4 horas antes o menos), y menores variaciones en los casos, en los cuales los eventos previos se dieron 24 horas antes o más.

Tabla 4. **Respuesta del caudal frente a eventos de magnitudes variables y de intensidades contrastantes.**

Las siglas QB significan caudal base y QP caudal pico.

Categoría Intensidad	Categoría magnitud	Magnitud (mm)	Intensidad (mm/h)	Tiempo evento anterior (h)	QB (l/s)	QP (l/s)	% incremento de caudal	Δ Caudal neto (l/s)
Baja	Tenua (< 1mm)	0,8	1,2	4,7	140,3	146,8	4,6	6,5
Moderada	Tenua (< 1mm)	0,8	2,4	5,5	105,5	114,0	8,1	8,6
Baja	Muy ligero (1 - 3 mm)	2,2	1,5	11,7	93,8	111,7	19,1	17,9
Moderada	Muy ligero (1 - 3 mm)	2,4	7,2	16,2	90,9	114,8	26,2	23,8
Baja	Ligero (3 - 10 mm)	10	2,2	24,2	33,3	91,9	176,1	58,6
Moderada	Ligero (3 - 10 mm)	8,6	7,4	24	71,4	178,7	150,2	107,3
Baja	Moderado (10 - 40 mm)	14,4	2,9	6,2	58,3	212,1	264,1	153,8
Moderada	Moderado (10 - 40 mm)	16,4	12,6	14,8	80,6	375,3	365,9	294,8

Figura 4. Volumen acumulado de precipitación y caudales en el Páramo de Mixteque.

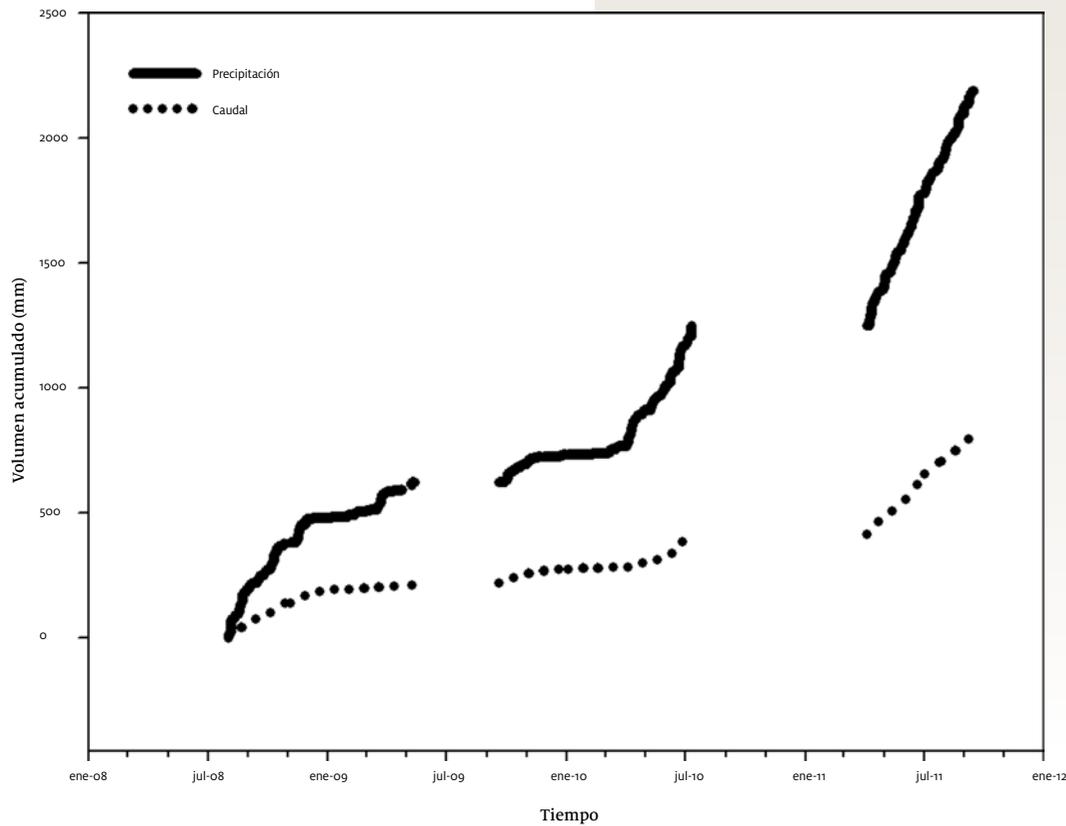


Tabla 5. Precipitación y caudales mensuales, relación entre caudal versus las entradas por precipitación mensual en la microcuenca. Caudales promedios diarios de cada mes (Qpro).

Las siglas significan: Mes húmedo (MH), Mes seco (MS), Mes de transición entre la época húmeda y la seca (MTHS) y Mes de transición entre la época seca y la húmeda (MTSH).

	Fecha	Pp (mm/mes)	Q (mm/mes)	% Q	Qpro (l/s/km ²)
MH	sep-08	88,2	31,4	35,5	12,1
MH	oct-08	109,4	42,5	38,8	18,2
MH	nov-08	110,3	36,1	32,7	15,5
MTHS	dic-08	6,6	15,6	236,4	5,8
MS	ene-09	7,2	5,7	79,6	2,1
MS	feb-09	21,0	4,0	18,9	1,6
MTSH	mar-09	83,1	6,8	8,1	2,5
MH	oct-09	72,4	25,4	35,1	9,5
MH	nov-09	37,1	15,6	42,1	6,0
MTHS	dic-09	15,5	6,6	42,7	2,5
MS	ene-10	0,0	3,2	320,0	1,2
MS	feb-10	6,5	1,5	22,6	0,6
MTSH	mar-10	33,7	3,3	9,7	1,2
MH	abr-10	168,6	19,2	11,4	7,4
MH	may-10	117,3	21,7	18,5	8,1
MH	jun-10	200,1	68,9	34,4	26,6
MH	abr-11	144,7	22,3	15,4	25,8
MH	may-11	196,4	28,5	14,5	26,4
MH	jun-11	218,9	54,3	24,8	46,9
MH	jul-11	157,5	61,1	38,8	24,4
MH	ago-11	189,2	68,1	36,0	25,4

Al analizar los caudales versus las precipitaciones mensuales (Tabla 5), se observó que la proporción de las precipitaciones que sale como drenaje superficial en el páramo de Mixteque varía considerablemente. Se calculó que durante los meses húmedos los caudales representaron en promedio el 25% de las entradas por precipitación, con un máximo de 38,8% de las mismas. Durante los meses de transición entre la época húmeda a la seca, el drenaje superficial fue el 37% de los ingresos, durante estos meses se observó una descarga muy similar en los dos periodos de transición monitoreados (años 2008 y 2009, Tabla 5 y Figura 3B). En los meses secos los caudales se igualaron o superaron las precipitaciones mensuales, como se observó en los meses diciembre y enero de 2008 y en enero de 2010, este último con precipitación igual a cero. Para estos meses el caudal representó en promedio 140% de las entradas. Contrariamente, durante los meses de transición de la época seca a la húmeda el drenaje superficial fue apenas el 14% de las precipitaciones.

Al analizar las curvas de volumen acumulado (Figura 4) se observó que la pendiente de descarga de caudal fue menor que la pendiente de ingreso por precipitaciones, comportamiento que se hace más notorio en los periodos húmedos. El caudal acumulado total de todos los periodos estudiados, representó un 36% de la precipitación acumulada.

Por otra parte, al analizar el mapa de geomorfología de la microcuenca donde domina el modelado glacial, periglacial y fluvio-glacial, se halló que las formas de relieve del área de estudio está dominada por till sobre laderas, unidad que abarca el 53% del área, seguido luego por los afloramientos rocosos (18%), till sobre el fondo de valle (17%) y lagunas y humedales sobre cubetas de sobreescavamiento (8%). El resto del área lo representan morrenas de retroceso y derrubios rocosos. Las morrenas laterales prácticamente han sido desmanteladas por la erosión.

Con respecto a las características edáficas, se encontró que tanto los suelos de las laderas y del fondo de valle poseen texturas franco-arenosa. Se hallaron altas conductividades hidráulicas en las laderas de $6,6 \text{ cm h}^{-1}$ y bajas de $0,90 \text{ cm h}^{-1}$ en el fondo de valle y de $1,8 \text{ cm h}^{-1}$ en los humedales. Los contenidos de agua edáfica en los suelos de laderas presentaron un valor promedio igual a $0,195 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ durante la época lluviosa y $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en la seca, como resultado de un fuerte descenso al escasear las precipitaciones. Los suelos del fondo de valle presentaron promedios estacionales igual a $0,36$ y $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ respectivamente, a diferencia de los más orgánicos de los humedales cuyos contenidos de agua promedio fueron $0,93$ y $0,88 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, valores que ilustran una pequeña variación entre ambos periodos y el mantenimiento de elevados contenidos de agua en los suelos de esta unidad.

Discusión y conclusiones

El páramo de Mixteque posee un régimen unimodal de precipitación, que indica una clara influencia del patrón climático de los Llanos de Venezuela. Al igual que el resto de los páramos venezolanos los meses diciembre, enero y febrero corresponden a meses secos, sin embargo, en otros páramos la época seca puede llegar a ser de hasta 5 meses en años con promedios menores a la media anual (Monasterio y Reyes 1980). Según estos autores, la precipitación en los meses secos oscila entre 5 y 8 mm en los páramos de Mucuchíes y San Rafael. Según lo reportado, el páramo de Mixteque es más húmedo que estos páramos venezolanos (ubicados en los bolsones secos intermontanos) por tener una época seca más corta (solo 3 meses) y precipitación anual mayor.

A diferencia de los páramos venezolanos, en la mayoría de los páramos de Ecuador y Colombia no existe temporada seca, las precipitaciones en estos páramos se distribuyen uniformemente a lo largo del año (Célleri *et al.* 2009). Esta característica del clima paramero en estas latitudes parece ejercer una fuerte influencia en el papel regulador que poseen estos ecosistemas (Buytaert *et al.* 2008b).

La marcada estacionalidad de las precipitaciones en los páramos venezolanos, genera una mayor necesidad de abastecimiento de quebradas y ríos provenientes de este ecosistema, ya que frente a las pocas precipitaciones la actividad agrícola debe canalizar y abastecerse de agua a través de sistemas de riego. Por otra parte, durante la época seca, la radiación que ingresa al páramo es muy elevada (1.240 W m^{-2}), condición que incrementa las demandas evaporativas y mayores requerimientos del recurso.

Para el periodo completo de registros, el Páramo de Mixteque aportó como caudal el 36% de las precipitaciones que recibió. Salidas similares fueron reportadas para el páramo de Gavidía por Sarmiento (2000), quien halló que el drenaje en parcelas experimentales fue el 36,7% de las

precipitaciones. En los páramos ecuatorianos los caudales representan entre el 48 y el 79% de las precipitaciones. Esto indica que los páramos venezolanos (a escala regional considerados como páramos secos) poseen menores rendimientos como proveedores de agua, como consecuencia del patrón estacional y los menores ingresos por precipitación.

El caudal del páramo de Mixteque presentó un comportamiento similar al patrón de sus precipitaciones. Este comportamiento hidrológico del páramo venezolano es notoriamente diferente al de otros páramos descritos en Ecuador y Colombia, en los cuales no es posible apreciar dicha estacionalidad, sino el mantenimiento del caudal a lo largo del año (Buytaert *et al.* 2006a; de Bievre *et al.* 2006).

Analizando la capacidad de regulación hídrica del páramo de Mixteque, los análisis a escala diaria y por eventos de precipitación y caudal, parecen indicar que su capacidad de regulación es baja. Fue notorio el incremento del caudal frente cualquier evento, inclusive para aquellos de magnitudes bajas. Se encontró una clara correspondencia entre la variación del caudal con la magnitud y frecuencia de las precipitaciones. Esta tendencia difiere con los páramos de Ecuador, cuyos caudales presentaron picos altos únicamente cuando las precipitaciones moderadas ocurrieron con alta frecuencia; las lluvias de gran magnitud aisladas generaron poca variación del caudal, es decir poseen respuestas de flujo menores, demostrando una mayor capacidad de regulación (Buytaert *et al.* 2007).

El comportamiento dinámico de los caudales fuertemente dependiente de las precipitaciones en la época húmeda, debe estar asociado a la gran superficie de afloramientos rocosos en la microcuenca (18% del área), unidad sobre la que escurre la totalidad de las precipitaciones que recibe. Por otra parte, las laderas (que representan el 53% de la superficie de la microcuenca) regulan escasamente el flujo hídrico, como

consecuencia de sus pendientes fuertes a moderadas, suelos altamente pedregosos, con horizonte organomineral poco desarrollado, con poca profundidad efectiva y de texturas franco arenosas, elevada conductividad hidráulica saturada, los cuales son incapaces de retener gran parte del agua que reciben, al menos en los primeros 10 cm de profundidad. Estas dos unidades geomorfológicas que cubren más de dos tercios de la superficie de la microcuenca deben tener una fuerte repercusión en su comportamiento hidrológico. Sobre los fondos de valle, cubiertos de till morrénico, se encontró una mejor capacidad de retención de agua en los primeros 10 cm de profundidad, asociada a menores pendientes y mayores contenidos de arcillas. Esta unidad posiblemente abastece al caudal durante las primeras semanas de la época seca y no durante toda esta, ya que se encontró un notorio descenso de su contenido de agua edáfica para dicho período en los primeros 10 cm.

Por el contrario, los suelos orgánicos de los humedales mantuvieron permanentemente elevados contenidos de agua durante toda la época seca. Esto parece indicar, que en el proceso de regulación hídrica, las lagunas y humedales (8% de la superficie) parecen cumplir un importante papel como reservorios de agua durante toda la época seca. De la capacidad de almacenamiento de las lagunas y humedales parece depender buena parte de la regulación hídrica de este páramo. Los humedales, tan importantes durante los meses secos parecen no regular el caudal en los meses húmedos, debido a que después de la temporada seca, se recargan rápidamente en los meses de transición y durante el primer mes de la temporada húmeda. Una vez saturadas estas unidades la lluvia no infiltrará y escurrirá rápidamente a la red de drenaje. El proceso de recarga es posible visualizarlo en la figura 3B y en la tabla 5, específicamente en el mes marzo

de 2009, en el cual llovió 83,1 mm y apenas salió como caudal 6,8 mm (8,1%), de igual manera, esto se apreció en abril de 2010, en el cual ingresaron 168,6 mm y drenaron como caudal 19,2 mm (11,4%). Este proceso también se observó en el análisis de volumen acumulado, específicamente en el segundo periodo de registros (Figura 4), cuya curva de precipitación incrementa fuertemente a partir de abril de 2010 en comparación con la curva de caudal, cuya pendiente varió ligeramente en este mismo tiempo, señalando la recarga de los suelos.

Durante la temporada seca, por el contrario, el caudal no fue tan sensible a las precipitaciones, este comportamiento debe ser resultado de bajos potenciales matriciales en los suelos de la microcuenca, que retuvieron una gran parte de las pocas precipitaciones que ingresaron y generaron bajo drenaje.

A pesar de la escasa regulación hídrica que presentan la mayor parte de los suelos del Páramo de Mixteque en los meses húmedos, el hecho de que el caudal se mantenga durante los meses secos, confirma la capacidad de almacenamiento de agua de este ecosistema. En esta función, las lagunas y humedales parecen ser una importante unidad recolectora y almacenadora del recurso en la época de lluvias y abastecedora en los meses secos. Al resaltar la importancia de las lagunas y los humedales en el almacenamiento y regulación hídrica de este ecosistema, no debemos olvidar la conectividad hídrica existente con las laderas, donde las precipitaciones infiltran y drenan subsuperficialmente alimentando la red de humedales de laderas y ojos de agua (manantiales) y contribuyendo en la recarga lenta y constante de las unidades de fondo de valle. Con estos hechos hidrológicos, resaltamos la importancia y urgencia de la conservación del páramo como un conjunto de unidades ecohidrológicas indivisible, proveedoras de agua y vida.

Agradecimientos

Queremos hacer nuestro más sincero agradecimiento al Proyecto Páramo Andino que financió la adquisición de los equipos, asesoró y apoyó plenamente el desarrollo de esta investigación. Agradecemos además al Fondo Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación del Ministerio de Ciencias y Tecnologías de Venezuela y al CDCHT – ULA (C-1654-09-01-EM). Por otra parte, agradecemos a todas aquellas personas que desinteresadamente nos han acompañado en el monitoreo de campo, que ayudaron en la instalación y el mantenimiento de los equipos, entre ellas podemos nombrar a José Gregorio Monsalve, Williams Dugarte, Nelson Márquez, entre otros más, a los parameros Franklin Dávila (Chon), Néptali Dávila y toda su bella familia, María Vicenta Dávila, a los Comités de Riego de Mixteque y Miguaguó, y a la comunidad de Mixteque en general, de quienes surgió la iniciativa voluntaria de cercar las estaciones, velar por el cuidado de los equipos y apoyar durante el monitoreo. A todos ellos, gracias!!

Dedicatoria

A la Comunidad y Comité de Riego de Mixteque, en especial a las mujeres parameras que dan su vida por la conservación del páramo y su agua: María Vicenta Dávila y Ligia Parra.

Referencias

- Buytaert W, Sevink J, de Leeuw B, Deckers J.** 2005. Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian paramo region. *Geoderma* 127 (1-2):114-129.
- Buytaert W, Célleri R, de Bièvre B, Cisneros F, Wyseure G, Deckers J, Hofstede R.** 2006a. Human impact on the hydrology of the Andean Paramos. *Earth-Science Reviews* 79:53-72.
- Buytaert W, Iñiguez V, Célleri R, de Bievre B, Wyseure G, Deckers J.** 2006b. Analysis of the water balance of small paramo catchments in south Ecuador. In: Kreck J, Haigh M, editors *Environmental Role of Wetlands in Headwaters*. Springer. pp:271-281.
- Buytaert W, de Bievre B, Célleri R, Cisneros F, Wyseure W, Deckers J.** 2008a. Comment on "Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes" (Carol P. Harden, *Geomorphology* 79, 249-263). *Geomorphology*: 96 (1-2):239-246.
- Célleri R, Feyen J.** 2009. The hydrology of tropical andean ecosystems: importance, knowledge status and perspectives. *Mountain Research and Development* 29 (4): 350-355.
- De Bievre B, Iñiguez V, Buytaert W.** 2006. Hidrología del Páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. En: *Investigaciones biofísicas en el páramo*. GTP/Abya Yala.
- FAO.** 1990. Evapotranspiración del Cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. FAO Fiat Panis.
- Francou B, Pouyaud B.** 2004. Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales, Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1. IRD, GREAT-ICE y GLACIOCLIM.
- García D.** 2006. El agua: patrimonio y derecho. Foro de los Recursos Hídricos. Cuadernos populares del agua. Primera edición. Ecuador.
- Harden C.** 2006. Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology* 79:249-263.
- Hofstede R.** 2003. Los páramos en el mundo: su diversidad y sus habitantes. En: Hofstede R, Segarra P, Mena P, editores. *Los páramos del mundo*. Quito, Ecuador: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia.
- Josse C, Cuesta F, Navarro G, Barrena V, Cabrera E, Chacon-Moreno E, Ferreira W, Peralvo M, Saito J, Tovar A.** 2009. *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru y Venezuela*. Lima: Secretaria General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Paramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAVH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, Rumbol SRL.
- Malagón D.** 1982. Evolución de suelos en el páramo andino. Mérida, Venezuela: CIDIAT.
- Molinillo M, Monasterio M.** 2005. El Complejo de Humedales del Páramo El Banco. En: *Turberas Altoandinas. Espacios Frágiles de Vida y Cultura*. En: Izurieta X, editor. *Proyecto Peatlands in the Tropical Andes*. Global Peatlands Initiative/NC-IUCN/ECOPAR/Grupo Páramo. Quito, Ecuador.
- Monasterio M, Reyes.** 1980. Diversidad ambiental y variación de la vegetación en los Páramos de Los Andes Venezolanos. En: Monasterio M, editor. *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Mérida, Venezuela: Ediciones de la Universidad de Los Andes.
- Monasterio M.** 1980. Los Páramos Andinos como región natural, Características Biogeográficas Generales y Afinidades con Otras Regiones Andinas. En: Monasterio M, editor: *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Mérida, Venezuela: Ediciones de la Universidad de Los Andes.
- Monasterio M, Celecia M.** 1991. El Norte de los Andes tropicales. Sistemas naturales y agrarios en la Cordillera de Mérida. *Ambiente* 68:2-6.
- Monasterio M, Molinillo M.** 2003. Venezuela. En: Hofstede R Segarra, Mena P, editores (Eds). *Los páramos del mundo*. Quito, Ecuador: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia.
- Monasterio M, Smith KS, Molinillo M.** 2006. Agricultural Development and Biodiversity Conservation in the Páramo Environments of the Andes of Mérida, Venezuela. In: Spehn EM, Liberman M Körner C editors. *Land Use Change and Mountain Biodiversity*. USA: Taylor and Francis Group.
- Poulenard J, Podwojewski P, Janeau JL, Collinet J.** 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian paramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45:185-207.
- Sarmiento L, Monasterio M.** 1993. Elementos para la interpretación ecológica de un sistema agrícola campesino de los Andes venezolanos (páramo de Gavidia). En: Rabey M, editor. *El Uso Tradicional de los Recursos Naturales en Montañas: Tradición y Transformación*. Montevideo: UNESCO-ORCYT. pp. 55-77.
- Sarmiento L.** 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain Research and Development* 20(3):246-253.
- Schubert C, Vivas L.** 1993. *El cuaternario de la cordillera de Mérida. Andes venezolanos*. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes y Fundación Polar.
- Suárez MM.** 1978. Cambios en la economía agraria en poblaciones rurales de los Andes Venezolanos. París: Actas del XVII Congreso de Américas. Volumen 1.
- Vivas L.** 1992. *Los Andes Venezolanos*. Caracas, Venezuela: Academia Nacional de la Historia.