

**REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE MONITOREO DE LA CANTIDAD DE AGUA  
EN PÁRAMOS**

**SINDY KATHERIN NAVARRO VEGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2017**

**REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE MONITOREO DE LA CANTIDAD DE AGUA  
EN PÁRAMOS**

**SINDY KATHERIN NAVARRO VEGA**

**Proyecto de grado en Modalidad de Investigación para optar el título de  
Ingeniera Civil**

**Director**

**ISABEL CRISTINA DOMÍNGUEZ RIVERA**

**Ingeniera sanitaria, MSc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA, SANTANDER**

**2017**

“A Dios por retener lo que merezco y a cambio mostrar su misericordia  
A mi familia por su incondicionalidad  
A los amigos y compañeros de esta etapa  
A los profesores de la EIC por su dedicación”

En él estaba la vida, y la vida era la luz de los hombres.

Juan 1:4

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	13
1. METODOLOGÍA .....	15
1.1 BÚSQUEDA DE LITERATURA.....	15
1. 2 SELECCIÓN DE LITERATURA .....	15
1. 3 SELECCIÓN DE PARÁMETROS. ....	16
1.4 IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS USADOS .....	16
1.5 ANÁLISIS Y SÍNTESIS .....	17
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
2.1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL MONITOREO DE AGUA EN PÁRAMOS.....	18
2.1.1 Publicaciones por país. ....	19
2.1.2 Publicaciones por autor y año.....	20
2.2 PARÁMETROS MÁS USADOS PARA MONITOREAR LA CANTIDAD DE AGUA EN LOS PÁRAMOS.....	21
2.2.1 Precipitación. ....	23
2.2.2 Evapotranspiración. ....	24
2.2.3. Densidad aparente.....	24
2.2.4 Conductividad hidráulica.....	25
2.2.5 Infiltración.....	25
2.2.6 Contenido de materia orgánica.....	26
2.2.7 Escorrentía.....	26

2.2.8 Caudal.....	27
2.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS USADOS.....	27
2.3.1 Precipitación. ....	28
2.3.2 Evapotranspiración. ....	31
2.3.3 Densidad aparente.....	34
2.3.4 Conductividad hidráulica.....	34
2.3.5 Infiltración.....	36
2.3.6 Contenido de materia orgánica. ....	37
2.3.7 Escorrentía.....	37
2.3.8 Caudal.....	38
3. PROPUESTA INICIO DE MONITOREO DE PARÁMETROS EN LA CUENCA DEL RIO JORDAN.....	40
4. CONCLUSIONES .....	43
REFERENCIAS .....	45
BIBLIOGRAFÍA .....	50
ANEXOS.....	53

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Métodos y técnicas de medición de cada parámetro .....	28
Tabla 2 Ventajas y desventajas métodos de medición. ....	39

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Resumen pasos metodología de la presente revisión. ....	15
Figura 2. Resumen de búsqueda y selección de literatura. ....	16
Figura 3. Tópicos de los artículos con relación a páramos .....	19
Figura 4. Porcentaje de Artículos por país. ....	20
Figura 5. Autores de mayor participación. ....	20
Figura 6. Porcentaje de artículos publicados por año. ....	21
Figura 7. Porcentaje de literatura en la que aparece el parámetro. ....	21
Figura 8. Parámetros más usados para monitorear la cantidad de agua. ....	23
Figura 9. Recomendación de ubicación pluviómetros cuenca rio Jordán. ....	41
Figura 10. Recomendación de los lugares para llevar a cabo la medida del caudal. .....	42

## LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. Tabla porcentaje participación de autores en la literatura seleccionada. .....	53
ANEXO B. Parámetros relacionados con la cantidad de agua en páramos hallados en la literatura. ....	54
ANEXO C. Tabla métodos y técnicas de medición de parámetros .....	55
ANEXO D. Ejemplo de un semivariograma . ....	56
ANEXO E. Valores de referencia para la radiación de Angot (Ra). ....	57
ANEXO F. Tabla de duración diaria media del máximo de horas de sol posible para diferentes meses y latitudes (N) .....	58
ANEXO G. Imagen Vertedero muesca en v.....	59
ANEXO H. Valores de Ce para $\theta = 90$ .....	60
ANEXO I. Valores de Ce para cualquier valor de $\theta$ .....	61
ANEXO J. Factor de corrección kh para muescas en V de cualquier ángulo para la relación Kindsvater-Shen.....	62
ANEXO K. Ubicación cuenca rio Jordán.....	63
ANEXO L. Mapa isoyetas 2007. ....	64
ANEXO M. Mapa usos de suelo. ....	65
ANEXO N. Mapa Zonas de vida nivel de humedad. ....	66

## RESUMEN

**TÍTULO: REVISIÓN DE LITERATURA SOBRE MONITOREO DE LA CANTIDAD DE AGUA EN PÁRAMOS.\***

**AUTOR: SINDY KATHERIN NAVARRO VEGA.\*\***

**PALABRAS CLAVE: PÁRAMOS, AGUA, MONITOREO, CANTIDAD.**

### **DESCRIPCIÓN:**

El monitoreo de la cantidad de agua en páramos es el seguimiento de variables concernientes a la misma con el fin de determinar cambios, disponibilidad y tendencias del recurso. En el presente trabajo se desarrolló una revisión de literatura con el objetivo de identificar los parámetros más usados para el monitoreo de la cantidad de agua y determinar métodos y técnicas de medición de los mismos. Después de una selección de literatura, se identificaron como variables más frecuentes para el monitoreo en estos ecosistemas los parámetros: precipitación, evapotranspiración, infiltración, conductividad hidráulica, escorrentía, densidad aparente, contenido de materia orgánica del suelo y caudal. En segundo lugar, se determinaron los métodos de medición registrados en la literatura para dichos parámetros. Del presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones: la mayoría de parámetros están relacionados con características del suelo debido a que este actúa como regulador hídrico dentro del páramo, por lo tanto la alteración del suelo afecta directamente la cantidad de agua también a los demás parámetros y al ciclo hidrológico, lo que genera sequías en temporada seca e induce a inundaciones en épocas de lluvia. Generalmente, para la medición de parámetros se utilizan los mismos métodos de las tierras bajas, a excepción de la evapotranspiración, para la cual es necesario calibrar las ecuaciones con datos del páramo.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Ingeniera sanitaria, MSc, PhD.

## ABSTRACT

**TÍTULO: REVIEW OF LITERATURE ON MONITORING OF THE QUANTITY OF WATER IN PARAMOS.\***

**AUTHOR: SINDY KATHERIN NAVARRO VEGA.\*\***

**KEYWORDS: PÁRAMOS, WATER, MONITORING, QUANTITY.**

### **DESCRIPTION:**

The monitoring of water quantity in páramo ecosystems consist on a follow up to the variables related to water with the purpose of determining changes, availability and trends in the resource. In the present work, a literature review was developed with the objective of identifying the parameters most used for the monitoring of the quantity of water and to determine methods and techniques for measuring these parameters. After a literature selection, the following parameters were identified: precipitation, evapotranspiration, infiltration, hydraulic conductivity, runoff, bulk density, content of organic matter in soil, and flow rate. Secondly, the measurement methods recorded in the literature for these parameters were determined. From the present work the following conclusions were obtained: The majority of parameters are related to soil characteristics, because it acts as a hydric regulator within the páramo, therefore the alteration of the soil directly affects the quantity of water, also to the other parameters and to the hydrological cycle; which generates droughts in dry season and induces flooding in rainy season. Generally, for the measurement of parameters the same methods used in the context of low lands are used in páramos, with the exception of the evapotranspiration, in which it is necessary to calibrate the equations with data of the páramo.

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of civil engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera. Sanitary Engineering, MSc, PhD.

## INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la cantidad de agua tiene como fin la observación, medición y análisis de las variables concernientes a la misma con el fin de identificar la disponibilidad del recurso, cambios y tendencias a través del tiempo [1]. El monitoreo se hace necesario para plantear modelos hidrológicos, conocer la variación de la entrada de agua o realizar pronósticos con respecto a la misma [2], [3].

Los páramos son montañas con valles y llanuras a su alrededor, suelos de gran humedad con lagos, turberas, pastizales húmedos y bosques de baja estatura. Debido a su original topografía y condiciones climáticas, el 60% de las plantas de páramo son endémicas, adaptadas a sus condiciones climáticas como la baja presión atmosférica, alta radiación ultravioleta y el viento. Sus suelos son húmicos de estructura abierta y porosa, las precipitaciones pueden variar de 700 mm hasta 3000 mm [4].

El páramo es proveedor principal de agua en los Andes, donde se utiliza para el consumo doméstico, agrícola, industrial y generación de energía; los ríos que descienden del páramo proporcionan un alto y sostenido caudal base [4]. Por lo tanto, los páramos son ambientes de gran importancia generando recursos a la comunidad pero no se les da la atención debida y no se cuenta con cantidad de datos meteorológicos ni hidrológicos suficientes para analizar su comportamiento [4]. En este sentido, factores por estudiar en los páramos son: la topografía, vegetación, los suelos, los cambios espaciales y temporales en los parámetros climáticos y los factores en la respuesta lluvia escurrentía [4].

Se requiere investigar en estos ecosistemas debido a que se desconoce el funcionamiento de los diferentes parámetros que influyen en la hidrología y por lo

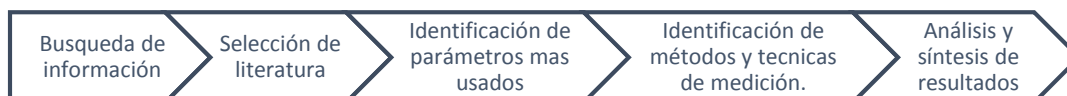
tanto se dificulta la gestión sostenible del recurso hídrico [4]. Por esto, se hace esencial conocer los parámetros concernientes a la cantidad de agua y hacer seguimiento por medio de métodos y técnicas para su medición.

El presente documento tiene como objetivo general revisar el estado del conocimiento sobre el monitoreo de la cantidad de agua en páramos y como objetivos específicos identificar los parámetros más usados para monitorear la cantidad de agua de los páramos y determinar los métodos y técnicas para la medición de los parámetros más usados para medir la cantidad del agua. El documento está estructurado de la siguiente manera: inicialmente se presenta la metodología con un resumen general del procedimiento de la revisión que narra el proceso de identificación y selección de parámetros; en segundo lugar está la sección de resultados donde se da una apreciación a cerca del estado del conocimiento sobre el monitoreo de agua en páramos a partir de la literatura seleccionada; seguidamente se incluyen los parámetros más usados en la literatura y técnicas de medición para dichos parámetros. Adicionalmente, con base en la revisión, se hace una propuesta de monitoreo de parámetros hidrológicos en una microcuenca de páramo en Santander. Finalmente se tienen las conclusiones y sugerencias para próximos estudios.

## 1. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la presente revisión de literatura se realizó el proceso que se sintetiza en la Figura 1 y se describe a continuación.

**Figura 1.** Resumen pasos metodología de la presente revisión.



### 1.1 BÚSQUEDA DE LITERATURA

Se realizó una búsqueda de literatura referente a monitoreo de la cantidad de agua en páramos en las siguientes bases de datos científicas: SCENCEDIRECT, SCOPUS y SPRINGER, en idioma español e inglés, usando palabras claves como: páramo, monitoreo, agua, cantidad, hidrología.

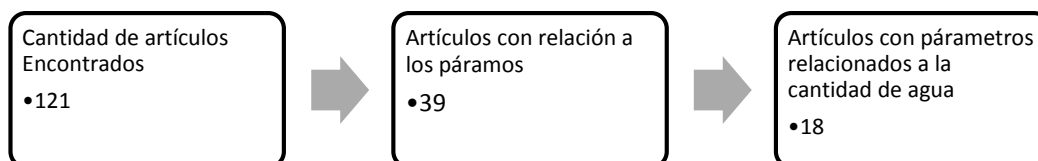
### 1.2 SELECCIÓN DE LITERATURA

La selección de literatura se realizó por medio de un análisis del título, el resumen y la disponibilidad en la web. Para la selección de los artículos se tuvo en cuenta que su temática contribuyera a resolver las siguientes preguntas con respecto a al monitoreo de la cantidad de agua en páramos:

- ¿Contiene parámetros a considerar con relación a la cantidad de agua en páramos?
- ¿Contiene los métodos o técnicas de medición de los parámetros?
- ¿El texto hace recomendaciones a cerca del monitoreo, tratamiento, medición, uso entre otros, de la cantidad de agua en el páramo?
- ¿Habla de la importancia del parámetro?

- ¿Menciona los factores que inciden sobre la cantidad de agua en el páramo? (efecto antrópico, clima, calentamiento global etc.)
- ¿Los factores que afectan la cantidad de agua generan disminución de la misma o deterioro del ecosistema?

**Figura 2.** Resumen de búsqueda y selección de literatura.



### **1. 3 SELECCIÓN DE PARÁMETROS.**

Para el análisis de la información se realizó la lectura de la literatura seleccionada para identificar y seleccionar los parámetros más usados.

Los parámetros se identificaron teniendo en cuenta la correlación con la cantidad de agua o sea si el cambio del parámetro o su valor afecta la cantidad de agua, eligiendo los más frecuentes encontrados en la literatura. Además, se tuvo en cuenta si el parámetro o variable tiende a cambiar en el transcurrir del tiempo y por lo tanto puedan ser sujetas al monitoreo.

Una vez identificados los parámetros, se realizó su registro y se determinó el porcentaje de veces que aparecía en la literatura seleccionada. Con el objeto de delimitar la revisión, se seleccionaron para un mayor estudio, los parámetros que aparecían en más del 15% de los artículos seleccionados.

### **1.4 IDENTIFICACIÓN DE MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS USADOS**

Los métodos y técnicas se tomaron de la literatura seleccionada, en su mayoría de la bibliografía citada por los autores, en caso de no estar disponible o solo nombrar

el método se dispuso de búsquedas adicionales en las diversas bases de datos. De la información acerca de los métodos y técnicas se realizó una tabla de ventajas y desventajas de los mismos.

### **1.5 ANÁLISIS Y SÍNTESIS**

A partir de la información hallada se llevó a cabo una descripción de los parámetros más usados para monitorear la cantidad de agua y su importancia en el contexto de los páramos como también se describen los métodos y técnicas de medición de los mismos y sus características.

Además de esto, se realizó una propuesta de inicio de monitoreo de parámetros para la microcuenca del río Jordán, aunque no estaba incluido dentro de la propuesta inicial de trabajo de grado.

## **2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A partir de la búsqueda y selección de literatura se hallaron 39 artículos con información relacionada a páramos, en su mayoría los tópicos hallados fueron acerca de las respuestas hidrológicas al efecto antrópico y gestión sostenible y la mayoría de los artículos seleccionados para la presente revisión con parámetros para el monitoreo de la cantidad de agua están en los tópicos de respuestas hidrológicas al efecto antrópico, hidrología del entorno de páramo, propiedades hídricas del suelo y cambio climático (Figura 3). Con base en la información seleccionada, a continuación, se describe el estado del conocimiento de la cantidad de agua en páramos, inicialmente dando una apreciación a cerca de países autores y publicaciones, seguidamente narrando los parámetros más usados en la literatura con una breve discusión de los aspectos de cada cual y en tercer lugar la descripción de los métodos de medición de dichos parámetros.

### **2.1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL MONITOREO DE AGUA EN PÁRAMOS**

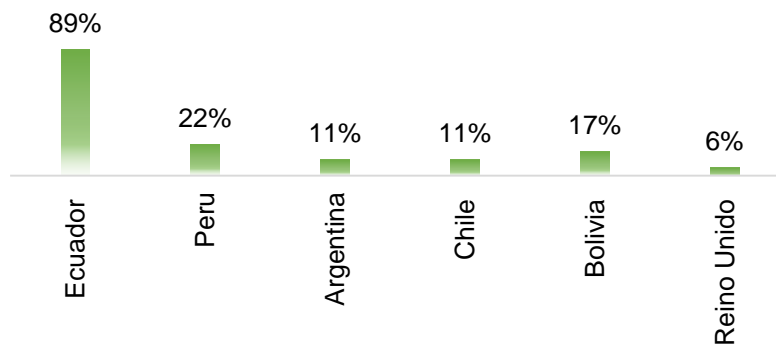
En el estudio de los páramos se aprecia poca investigación y por consiguiente bajo monitoreo, lo que lleva al desconocimiento del manejo y gestión de sus recursos como el agua. Según la literatura seleccionada, los países con presencia de páramos no registra porcentaje de información sobresaliente acerca del monitoreo de la cantidad de agua. La mayor participación en publicaciones la tiene Ecuador con la entidad de participación representativa el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, de la Universidad de Cuenca (Anexo A).

**Figura 3.** Tópicos de los artículos con relación a páramos



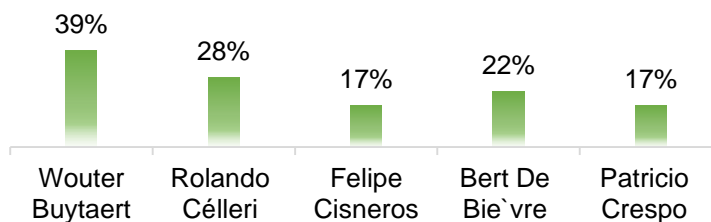
**2.1.1 Publicaciones por país.** Se encontró que los lugares con mayor reporte de información de páramos dentro de la literatura seleccionada son los países de Ecuador y Perú con un porcentaje de 89 y 22%, respectivamente como se muestra en la figura 4. Es probable que estos porcentajes se deban a que el páramo en Ecuador tiene gran influencia con respecto al área del país y a su vez tiene una considerable área de 39.8% de los páramos andinos, no muy lejano al área de paramos andinos en Colombia de 30.5% y Perú con un 24.6% [6]. Estos resultados muestran escaso estudio del tema en países que también cuentan con área considerable de estos ambientes.

**Figura 4.** Porcentaje de Artículos por país.



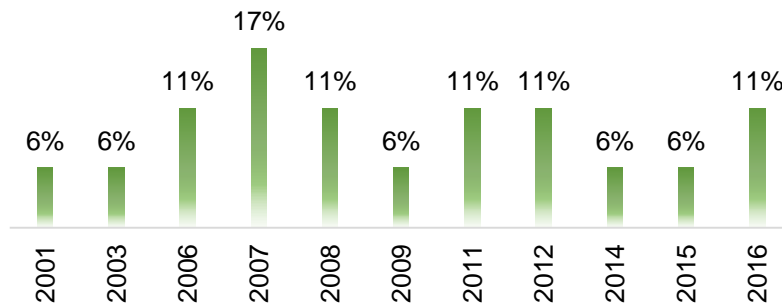
**2.1.2 Publicaciones por autor y año.** Los autores con mayor participación en la literatura seleccionada fueron: Wouter Buytaert, Rolando Céleri, Felipe Cisneros, Bert De Bie`vre y Patricio Crespo (Figura 5). Estos autores han realizado sus estudios en los páramos del Ecuador con la universidad de Cuenca, con investigaciones entre los años 2005 al 2016 (Anexo A).

**Figura 5.** Autores de mayor participación.



La Figura 6 muestra las publicaciones por año de la literatura seleccionada. La temática acerca del monitoreo de la cantidad de agua en los páramos es de baja investigación contrariamente a su grado importancia.

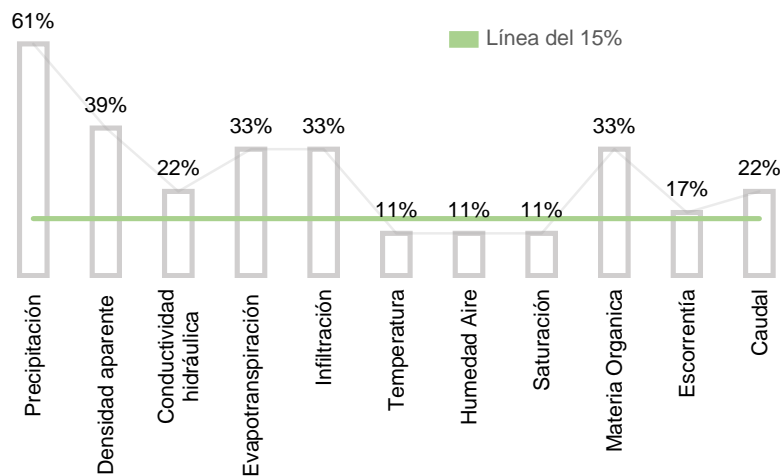
**Figura 6.** Porcentaje de artículos publicados por año.



## 2.2 PARÁMETROS MÁS USADOS PARA MONITOREAR LA CANTIDAD DE AGUA EN LOS PÁRAMOS

Se seleccionaron los parámetros que aparecen con mayor frecuencia, por lo tanto se consideraron aquellos que aparecen en más del 15% de la literatura seleccionada (Figura 7). Mayor detalle en relación con los parámetros y las fuentes de información donde aparece en el Anexo B.

**Figura 7.** Porcentaje de literatura en la que aparece el parámetro.

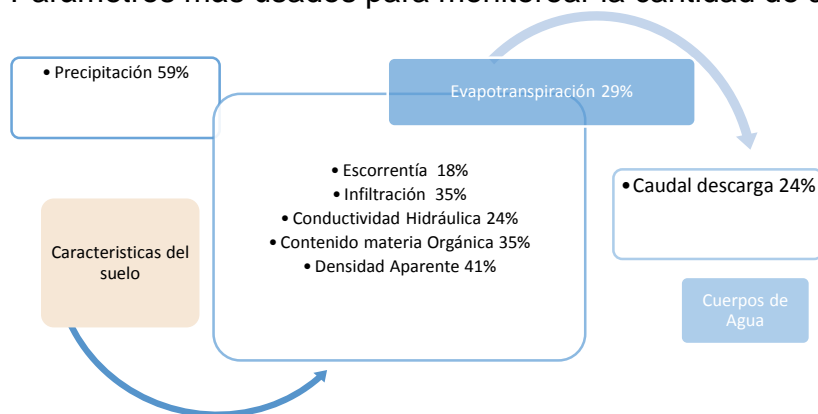


Dentro de la literatura, se observa que los parámetros hidrológicos y meteorológicos interactúan y tienen cierta dependencia entre sí, por ejemplo: A mayor altura mayor precipitación y bajas temperaturas, lo que favorece la humedad, acumulación de la materia orgánica del suelo, baja densidad aparente y saturación entre el 89 y 90% [4], [5].(Figura 8). De la misma manera, un estudio realizado en la región de los Andes para comprender la relación lluvia-escorrentía reveló que la cantidad de agua y su distribución eran controlados por la precipitación, pendiente, densidad aparente de la capa superior de suelo, conductividad hidráulica de la capa superior e inferior del suelo, la evapotranspiración como resto de balance hídrico y porcentaje de caudal lento [7]. En su mayoría, estos parámetros se relacionan con propiedades del suelo debido a que la regulación hidrológica del páramo se desarrolla mayormente por la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo [7], esta agua se distribuye durante el año aportando caudal aún en temporada seca a las zonas cercanas, de modo que los páramos son esenciales para el sustento de los ambientes y comunidades alrededor [8], [9]. Por lo tanto, es de gran importancia el estudio de las variables relacionadas con el suelo, pues el cambio de la cobertura y uso del suelo genera deterioro ambiental, ecológico y geomorfológico, como aumento de la erosión, disminución de la humedad de suelo, disminución de la cantidad de carbono orgánico y pérdida de capacidad de regulación hídrica lo que afecta negativamente el ciclo del agua [4], [10].

Otros efectos del cambio de uso y deterioro del suelo son la compactación y pérdida de la estructura original del suelo, esto lleva al aumento de la densidad aparente, disminución de la capacidad de infiltración, disminución de la conductividad hidráulica y aumento de la escorrentía, lo que puede inducir a inundaciones en las temporadas de lluvia y escasez de agua en las temporadas secas [11].

A continuación se discuten aspectos sobre los parámetros seleccionados en el contexto del páramo.

**Figura 8.** Parámetros más usados para monitorear la cantidad de agua.



**2.2.1 Precipitación.** La precipitación es un proceso que hace parte del ciclo hidrológico, se da con el agua que se evapora desde la superficie de la tierra y se eleva en la atmosfera hasta alcanzar las condiciones de condensación y por último se precipita [12]. Los eventos de lluvia en los ambientes de páramo se caracterizan por ser de alta frecuencia y baja intensidad. La producción de agua en el páramo se debe principalmente a la alta precipitación, con valores entre 700 mm hasta 3000 mm y máximos de 6000 mm [4]; en microcuencas la precipitación puede variar entre 500 y 1900 mm [7] y se considera que estos ambientes aportan 2/3 de la precipitación anual [5].

La variabilidad de las precipitaciones en pequeñas escalas de área como cuencas o microcuencas está determinada por las variaciones en la dirección y velocidad del viento, que a su vez dependen de las pendientes y la topografía. Por lo tanto, existe gran variabilidad espacial, que puede conllevar a subestimar alta cantidad de agua en el sistema [4]. A escalas de mayor área, la precipitación en los Andes es influenciada por el Pacífico y la cuenca del Amazonas [4].

Debido al clima del páramo y sus características topográficas, la precipitación es una gran entrada del agua en estos ambientes, donde predominan las lluvias orográficas y de baja intensidad, por lo tanto, la precipitación es una variable clave en la

estimación y gestión del recurso hídrico pero debido a la baja densidad de redes de pluviómetro se dificulta tener un mejor récord de la precipitación [13].

**2.2.2 Evapotranspiración.** La evaporación es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie del suelo o las plantas a la atmósfera y la transpiración es el agua absorbida por las raíces de las plantas y eliminada por medio de las hojas, entonces la evapotranspiración es el agua total transferida a la atmósfera desde la superficie del ecosistema [14]. La evapotranspiración en páramos naturales tiende a ser baja, debido al bajo consumo de agua, pues la vegetación herbácea se caracteriza por especies xerófilas de baja evaporación. La evapotranspiración real es un factor por estudiar en cuanto a la hidrología del páramo. Algunos valores en la literatura están entre 0.8 mm/día y 1.5 mm/día. No obstante, estos valores pueden variar debido a que en su mayoría son hallados con métodos usados en lugares de baja altitud y además las propiedades de transpiración de la vegetación han sido poco estudiadas [4].

La evapotranspiración puede aumentar debido a su sensibilidad al cambio de la vegetación y uso de la tierra, por ejemplo: la plantación de pinos en algunos páramos se realizó con el fin de aumentar la captación de agua y protección del suelo pero su efecto fue el contrario, debido al aumento de hojas y mayor acceso de las raíces, lo que aumentó la evapotranspiración y tuvo como consecuencia la disminución de la disponibilidad de agua del suelo hasta rangos de aproximadamente el 70% [8].

**2.2.3. Densidad aparente.** La densidad aparente del suelo es una propiedad física que se usa como dato de entrada en modelos de transporte de agua. Dentro de la evaluación de la densidad aparente influye la compactación del suelo, cantidad de materia orgánica, profundidad y la diferencia en la distribución del tamaño en las partículas [15].

Este parámetro muestra la calidad del suelo, a menor densidad mejor es la estructura del suelo y contenido orgánico, mientras si la densidad es alta se refiere a un suelo más compactado que ha perdido su estructura. Esta característica es usada para predecir propiedades del suelo como parámetro de la curva de retención de agua o la conductividad hidráulica insaturada [16].

La densidad aparente en los suelos de páramo natural es baja, alrededor de  $0.2 \text{ gr/cm}^3$ , esto muestra alta porosidad, estructura abierta, buena infiltración, conductividad hidráulica, capacidad de retención de agua y alto contenido de materia orgánica [5], [17]. Debido a esto, se considera el suelo de páramos como el lugar donde existe mayor cantidad de agua [7].

**2.2.4 Conductividad hidráulica.** Esta es una propiedad de los medios porosos que muestra la movilidad del agua dentro del suelo. Este parámetro sirve para la caracterización y gestión del suelo [18]. Esta propiedad en los suelos de páramo suele ser mayor a menor profundidad, lo que hace que el suelo almacene un gran porcentaje de flujo lento y por lo tanto no hay un relevante flujo superficial. El cambio del uso del suelo crea disminución de la conductividad y por lo tanto también en la retención de agua lo que genera caída en la descarga durante la temporada seca [7]. La densidad aparente es una característica primordial en cuanto a trabajo regulador del suelo, de la que depende la distribución temporal del agua junto con la retención en el suelo y la humedad presente [7]. Una alta conductividad hidráulica es característica de los suelos páramos junto a un alto contenido de materia orgánica y estructura porosa [4]. Esta impide que la humedad del suelo baje a menos del 60 % [19].

**2.2.5 Infiltración.** La infiltración es el ingreso de agua sobre un suelo seco en condiciones no saturado, esta depende de otros parámetros como la intensidad de lluvia, tamaño de las gotas, porosidad del suelo, textura, pendiente entre otros y se

ve afectada ante el cambio de vegetación y labranza de suelos [20], [21]. En los suelos donde se ha afectado la vegetación, la infiltración puede disminuir cuatro veces el valor de un lugar con vegetación natural especialmente la arbustiva. La infiltración está fuertemente relacionada a la cantidad de materia orgánica e inversamente relacionada a la densidad del suelo [10]. Un valor bajo de infiltración puede representar pérdidas en retención de agua, una alta erosión y aumento de la escorrentía lo que induce a posible inundación, esto puede ser por la compactación de la capa superior del suelo debido por ejemplo a la labranza [4], [22], [21].

**2.2.6 Contenido de materia orgánica.** La materia orgánica del suelo se encuentra en formas próximas al carbono en residuos de plantas, animales y microorganismos y es un indicador de la productividad agrícola y forestal del suelo [23]. La acumulación de materia orgánica y ceniza volcánica hace suelos húmicos y de estructura abierta como los suelos de páramos con baja densidad aparente y capacidad de retención de agua [7]. La propiedades de la materia orgánica dependen de las características del medio como el clima, la topografía o la vegetación [23]. Esta variable es proporcional a la estructura abierta de los suelos, la infiltración y la vegetación arbustiva natural del páramo [10].

**2.2.7 Escorrentía.** Es la precipitación sobre la superficie terrestre, esta depende de la gestión, características y cobertura del suelo [11] [12]. La escorrentía en el páramo es algo eventual debido a las características de suelo como la porosidad, conductividad, infiltración. La escorrentía se puede presentar con mayor frecuencia en las cuencas cultivadas debido a la compactación y pérdida de la estructura del suelo [7]. Entonces debido a la degradación del suelo la respuesta lluvia-escorrentía es más rápida y alta que en una cuenca natural [19].

**2.2.8 Caudal.** El caudal es cantidad de agua que atraviesa una sección a cierta velocidad y se da en medidas de volumen sobre tiempo [1]. Dentro del contexto del páramo, debido a que el suelo de estos ambientes cuenta con la capacidad de almacenar el agua y distribuirla durante el año aún en temporada seca, los ríos a su alrededor proporcionan un alto caudal base, lo que es de vital importancia para los ambientes y comunidades cercanas al páramo [8], [4]. Debido a la capacidad del suelo, en las cuencas naturales los caudales picos son retrasados durante la lluvia y los periodos de caudal base son largos en temporada sin lluvia, mientras en la cuenca cultivada los caudales pico son altos durante la lluvia debido a la respuesta rápida y existe menor rendimiento del agua [19], después se presenta una intensa y rápida disminución del caudal, este proceso puede inducir inundaciones aguas abajo [11].

## **2.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS MÁS USADOS**

No toda la literatura seleccionada describe los métodos y técnicas empleados para medir los parámetros estudiados. Sin embargo, algunos mencionan el método y suministran una referencia bibliográfica. A partir de esa información se realizó una búsqueda adicional para determinar los métodos de medición de los parámetros (Anexo C). La Tabla 1 incluye un resumen de los parámetros y sus respectivos métodos.

**Tabla 1** Métodos y técnicas de medición de cada parámetro

<b>Parámetros</b>	<b>Métodos y técnicas</b>
<b>Precipitación</b>	Kriging universal
	Polígonos de Thiessen
<b>Evapotranspiración</b>	Modelo de Hargreaves & Samani (H-S)
	Penman-Monteith (FAO 56 PM)
<b>Densidad aparente del suelo</b>	Método de laboratorio
<b>Conductividad hidráulica</b>	Método de barrena de hoyos invertida
	Método del permeámetro de cabeza contante
<b>Infiltración</b>	Diferencia lluvia escorrentía
	Método de anillo de infiltración
<b>Contenido de materia orgánica</b>	Pérdida por ignición
	Método de Walkley-Black
<b>Escorrentía</b>	Coeficiente de Escorrentía
<b>Caudal de descarga</b>	Relación Kindsvater-Shen

**2.3.1 Precipitación.** Dentro de la literatura se percibe la necesidad no solamente de medir la lluvia y tener registros constantes en el tiempo sino también llegar a un modelamiento temporal y espacial debido a que si se quisiera tener un registro más exacto de la precipitación costaría mucho dinero aumentar la red pluviómetros en el área. Una de las técnicas encontradas en la literatura para registrar la precipitación, teniendo en cuenta la variabilidad espacial en función de la altitud y la extensión, es la instalación de dos pluviómetros, uno en la parte superior y otro en la parte inferior

de cada microcuenca. Debido a pequeñas diferencias en la lámina de agua entre pluviómetros de la misma cuenca se aplica el método de interpolación de los polígonos de Thiessen para calcular la precipitación del lugar [7]. Aún en las redes de alta densidad de pluviómetros también es necesaria la interpolación de datos, debido a las diferencias por variabilidad espacial y temporal.

En un estudio en el sur de los Andes en Ecuador [3], se utilizó una densidad de pluviómetros de 1 pluviómetro por 50 km<sup>2</sup> y el estudio fue dirigido a comprender la variación en interpolación de datos a pequeña escala comparando dos métodos de interpolación de diferente complejidad como lo son Thiessen y Kriging universal, con el fin de analizar la correlación entre la precipitación y la distribución espacial. En este caso, los dos métodos dieron resultados similares y con errores menores al 1.3 %. Sin embargo, Kriging arrojó mayor precisión que el método Thiessen. A continuación, se explican brevemente estos dos métodos.

-Método de Kriging universal : Este método se usa para calcular un semivariograma con la Ecuación 1

$$\gamma = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_i - z_{h+i}) \quad (1)$$

Donde

$\gamma$  = Es la semivarianza

$N(h)$  Es el número de puntos separados por la distancia  $h$

$z_i$  = Precipitación media al día en el punto  $i$ .

El semivariograma (Anexo D) muestra el comportamiento espacial de la precipitación, generando una malla de datos cada distancia  $h$  con la Ecuación 1. Esto ofrece una indicación de la influencia de un dato de un punto a otro punto o el grado de similitud de los datos a medida que están más lejos y hasta que distancia existe correlación entre los datos [24]. Esto puede resultar importante a la hora de decidir la distancia entre pluviómetros o en caso de no tener estaciones suficientes.

Este método arroja menores errores que el método de Thiessen, pero exige correlación con la topografía para mejorar el valor de la varianza de la distribución espacial [3].

- Método de Polígonos de Thiessen: En los polígonos Thiessen, la zona de captación se divide en polígonos de modo que cada polígono contiene un único punto de muestreo y cada punto interpolado toma el valor del punto muestreado más cercano [25]. Esto asume que en cualquier punto de la cuenca la precipitación es la misma que en la estación más cercana. Los polígonos se forman por las bisectrices perpendiculares de las líneas de unión entre medidores [26]. Con la Ecuación 2 se calcula la precipitación de la siguiente manera:

$$P = \frac{P_1F_1 + P_2F_2 + \dots + P_nF_n}{F} \quad (2)$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \frac{F_i}{F} \quad (3)$$

Donde

$P_i$  = Son los datos de precipitación diaria en la estación  $i$

$F_i$  = Es el área del polígono de Thiessen asociado con la estación  $i$

$F$  = Es el área de la sub-cuenca [27].

La ventaja de este método es su simplicidad. Sin embargo, su desventaja es que debido a que los datos se basan en una sola medición sin tener en cuenta datos de los otros puntos cercanos, puede existir alta discontinuidad entre el valor de un polígono y el siguiente [25].

Otra manera de cuantificar la precipitación es valiéndose de datos suministrados por las misiones satelitales como la misión de medición de lluvias tropicales 3B43 TRMM. Con este método, los registros salen en milímetros por día convertidos a milímetros por mes con datos entre los años 1998 a 2012. Al comparar datos de las

misiones espaciales con los de estaciones meteorológicas, las misiones subestiman la cantidad de precipitación en los Andes, pero tienen la ventaja de tener registros de largos periodos de tiempo, que son utilizados para una mayor aproximación junto con los datos esporádicos de las estaciones [28]. Estos datos son asequibles en la web desde el servidor NASA GIOVANNI [29].

**2.3.2 Evapotranspiración.** En la literatura se encontraron varias alternativas para determinar la evapotranspiración. Por ejemplo, la evapotranspiración puede calcularse como la diferencia acumulada entre la precipitación diaria y descarga diaria [4], o con la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), usando el Modelo de Hargreaves & Samani (H-S) [5], usando las Ecuaciones 4 y 5 [30]:

- Modelo de Hargreaves & Samani

$$ET_o = KE R_s (TP + 17.8) \quad (4)$$

$$R_s = KT R_a \sqrt{TD} \quad (5)$$

$ET_o$ : Evapotranspiración de referencia mm/día.

$KE$ : Coeficiente de reducción de  $ET_o$ , 0.0135.

$R_s$ : Radiación solar, mm día<sup>-1</sup> de evaporación.

17.8: Valor para utilizar la temperatura del aire en °C.

$TP$ : Temperatura promedio del aire entre la máxima y mínima del día, °C.

$TD$ : Amplitud térmica del día para periodos semanales o mensuales, °C.

$R_a$ : Valor de Angot de la radiación extraterrestre al tope de la atmósfera, mm/día de evaporación, sintetizados en el Anexo E.

$KT$ : Coeficiente para reducir los valores de temperatura a radiación solar: 0.162 y 0.19 para regiones interiores y costeras, respectivamente.

Reemplazando la Ecuación 5 en la Ecuación 4 se tiene:

$$ET_o = KE KT Ra \sqrt{TD} (TP + 17.8) \quad (6)$$

El método ha sido probado en zonas costeras y del interior en Ecuador [30].

Los valores de  $KT$  y  $KE$  se pueden calibrar al área de interés [30].

Aquí un resumen del procedimiento:

El valor de  $KT$  se calibra mediante la Ecuación 5 conociendo los valores de  $TD$  tomados día a día,  $Ra$  del Anexo E y  $RS$  con la Ecuación 7

$$Rs = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N}\right) Ra. \quad (7)$$

Donde

$n$  = Horas de sol brillante

$N$  = Horas de sol máximas

Los valores de  $N$  se hallan con información reportada en el Anexo F, y los valores de  $n$  se hallan con instrumentación meteorológica (heliógrafo). Seguidamente, se correlacionan los valores de  $KT$  con los valores de  $Rs$ ,  $TP$  y  $TD$  y se toma el de mejor valor de  $R^2$ .

El valor de  $KE$  se calibra mediante la ecuación 8

$$ET_o = KE Rs (TP + 17.8) \quad (8)$$

Donde la  $ET_o$  se halla con valores de bandeja de evaporación, los valores de  $KT$  se correlacionan con los valores de presión de vapor para cada día.

- Método de Penman-Monteith: La evapotranspiración por medio del método de Penman-Monteith se calcula mediante la Ecuación 9. Este método requiere datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar [31].

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34 u_2)} \quad (9)$$

Donde

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

$Rn$  = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup> día) [32].

$G$  = Densidad de flujo de calor del suelo (MJ/ m<sup>2</sup> día), que se asume como cero para cálculos diarios y para periodos más cortos diurnos como 0.1Rn y nocturnos como 0.5 Rn [32].

$T$  = Temperatura media diaria del aire (° C) a una altura de 2 m

$u_2$  = Velocidad del viento a una altura de 2 m (m/s)

$e_s$  = Presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$  = Presión de vapor real (kPa) y se basa en mediciones de humedad relativa

$e_s - e_a$  = Déficit de presión de vapor de saturación (VPD) (kPa)

$\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/° C)

$\gamma$  = Constante psicrométrica (kPa/° C).

En caso de no tener datos completos para hallar los valores de las variables arriba nombradas la literatura propone una metodología para calibración de variables y obtención de datos [31] [32].

Para encontrar la radiación solar se usa la Ecuación 10.

$$R_s = K R_s \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a \quad (10)$$

Donde

$R_a$  = Radiación extraterrestre (MJ / m<sup>2</sup> día)  $T_{max}$  = Temperatura máxima del aire (° C)  $T_{min}$  = Temperatura mínima del aire (° C)

$K R_s$  = Coeficiente de ajuste. Para regiones del interior, donde las masas de aire no están influenciadas por grandes cuerpos de agua se puede utilizar un valor de 0.16.

Para el cálculo de la presión de vapor se usa la Ecuación 11.

$$e_a = e^0(T_{min}) = 0.611 * e^{\frac{12.27 T_{min}}{T_{min}+273.3}} \quad (11)$$

Para la Velocidad del viento, si se tienen datos, se recomienda un valor medio de los valores del área, en el caso del estudio consultado se tomó un valor promedio de estaciones en el mundo de  $u_2 = 2 \text{ m/s}$  [31].

### **2.3.3 Densidad aparente.**

- Método de laboratorio: En el estudio encontrado en la revisión para determinar la densidad aparente del suelo se siguió una metodología en la cual se tomó una cuadrícula de 20mx20m con separación de 5m, sacando 16 muestras de material para suelos con profundidad menor a 50cm y más de 25 muestras para profundidad mayor. Las muestras se tomaron con una barrena rusa de capacidad de volumen aproximada de  $622 \text{ cm}^3$ . Estas se dividieron en secciones de 10 cm con volumen de  $124.4 \text{ cm}^3$ . Las muestras de suelo con su volumen conocido fueron llevadas al laboratorio, se pesaron y luego fueron llevadas al horno, a una temperatura de  $105^\circ\text{C}$  por un tiempo de 72 horas, después de esto, las muestras fueron pesadas nuevamente y con los datos del volumen y peso final se calculó su densidad aparente [16].

**2.3.4 Conductividad hidráulica.** Para medir la conductividad hidráulica en páramos se han empleado los métodos de la barrena de hoyos invertida y el método del permeámetro de cabeza constante, que se describen a continuación.

- Método de la barrena de hoyos invertida: Este método también es conocido como método de Porchet. Los principios de este método son que si se perfora el suelo y el agujero se llena de agua hasta que el suelo de abajo y de alrededor esté saturado, la velocidad de infiltración  $v$  será aproximadamente constante, la infiltración total está dada por la Ecuación 12 [7], [33].

$$Q = v \times A. \quad (12)$$

Donde A es la superficie de infiltración,  $v = K$ , entonces

$$Q = K * A \quad [33]. \quad (13)$$

Ahora el valor de A teniendo en cuenta el área transversal del agujero y sus paredes es como en la ecuación 14

$$A = \pi r^2 + 2\pi r h \quad (14)$$

Q Queda de la siguiente manera

$$Q = 2\pi r K \left( h + \frac{1}{2} r \right) \quad (15)$$

Otra manera de hallar Q es con la velocidad con la que desciende el agua

$$Q = -\pi r^2 \frac{dh}{dt} \quad (16)$$

Entonces se integra la Ecuación 17

$$r \frac{dh}{dt} = 2K \left( h + \frac{1}{2} r \right) \quad (17)$$

Lo que da como resultado el valor de K Ecuación 18

$$K = 1.15 r \frac{\log\left(h_0 + \frac{1}{2} r\right) - \log\left(h_t + \frac{1}{2} r\right)}{t - t_0} \quad (18)$$

Siendo:

$t$  = Tiempo de la medición en segundos.

$h_t$  = Altura del agua en el agujero en el tiempo  $t$  en centímetros.

$h_0 = h_t$  En el tiempo  $t = 0$  [33]

- Método del permeámetro de cabeza contante: Este método es una técnica de laboratorio donde las muestras se saturan y seguidamente se les aplica presión hidráulica y la conductividad hidráulica se halla mediante la Ecuación 19 derivada de la ecuación de Darcy [34].

$$K_s = \frac{Vl}{(l+d)tA} \quad (19)$$

Donde:

$K_s$  (mm/h) = conductividad hidráulica saturada

$V$  (mm<sup>3</sup>) = el volumen de agua que fluye a través de la sección  $A$  (mm<sup>2</sup>)

$t$  (h) = el tiempo

$l$  (mm) = la altura de la muestra de suelo

$d$  (mm) = altura de la cabeza de agua.

Este método tiene como ventaja que su procedimiento y toma de la muestra lleva poco tiempo, importante para muestreos de áreas remotas [34].

**2.3.5 Infiltración.** Se encontró que en los estudios en páramos la infiltración ha sido medida por simulación y por el método del anillo de infiltración.

- Por simulación: Para hallar la infiltración con datos previos de simulación de lluvia se debe tener el volumen acumulado de las precipitaciones antes del inicio de la escorrentía y el flujo de infiltración se halla por la diferencia entre la intensidad de lluvia y la tasa de escorrentía [22].

- Método del anillo de infiltración: Consiste en insertar en el suelo a 3 cm de profundidad un anillo de 25 cm de altura y 17 de diámetro con un borde afilado. Seguidamente, se vierte 1 litro de agua y se contabiliza el tiempo en que el agua se infiltra, si sobrepasa a los 10 minutos se mide la altura del agua restante para calcular el contenido y por diferencia calcular el agua infiltrada [10].

La tasa de infiltración se puede calcular con la Ecuación 20:

$$I = Q/At \quad (20)$$

Donde

$I$  = Es la tasa de infiltración en cm/s

$Q$  = Es el volumen de agua vertido en el cilindro en cm<sup>3</sup>

$A$  = Es el área de la abertura del cilindro  $\text{cm}^2$

$t$  = Es el tiempo en segundos transcurrido hasta que se infiltrara toda el agua en el cilindro.

**2.3.6 Contenido de materia orgánica.** Se encontraron dos métodos para determinar el contenido de materia orgánica: pérdida por ignición y el método de combustión por humedad.

-Pérdida por ignición: Consiste en poner la muestra de suelo a una temperatura de  $430^\circ\text{C}$  durante 24 h en un horno mufla y medir la pérdida de peso. El método elimina el contenido total de materia orgánica. Es un método económico debido a que no requiere material químico y necesita pocas horas de mano de obra [23].

- Método de combustión humedad: Consiste en introducir el suelo en un medio de ácido sulfúrico y la oxidación del carbono orgánico se realiza con dicromato de potasio. Este método excluye entre el 90 y 95% del carbono elemental, por lo tanto es necesario un factor de corrección, generalmente se utiliza 1.32 suponiendo que se oxida el 76% del carbono. El factor usado para determinar la cantidad de materia orgánica es 2 suponiendo que la materia orgánica es 2 veces la cantidad de carbono orgánico, también autores sugieren un valor cercano a 2 para horizontes superficiales. El contenido de iones y óxidos puede interferir en la cuantificación de la materia orgánica, más su procedimiento es de baja complejidad y bajos costos [23].

**2.3.7 Escorrentía.** Para el cálculo de la escorrentía en la cuenca Jadan cerca de Cuenca Ecuador se realizó la simulación de lluvia para cuantificar la respuesta hidrológica. Se realizaron simulaciones en lugares de  $1\text{m}^2$  delimitados con cuatro placas finas de acero de 1m de largo cada una. La escorrentía se recogió en una zanja en la parte inferior del área de escurrimiento, seguidamente como variable de

respuesta se hallaron los valores de coeficiente de escorrentía para cada lugar con la ecuación 21.

- Ecuación para coeficiente de escorrentía

$$RC = \left( \frac{RR}{RI} \right) * 100 \quad (21)$$

Donde

$RC \%$  = Coeficiente de escorrentía acumulada

$RR$  = Escorrentía total

$RI$  = Precipitación total después de 45 minutos de lluvia simulada [11].

**2.3.8 Caudal.** En microcuencas al Sur de Ecuador entre Riobamba y Loja el caudal fue medido con un vertedero de Thomson con muesca en V (Anexo G). La medición de la descarga se realizó con la Ecuación 23 de la relación Kindsvater-Shen [7], [35], [36].

$$Q = 4.28 C_e \tan \frac{\theta}{2} h_1 e^{5/2} \quad (22)$$

Dónde:

$Q$  = descarga sobre el vertedero en  $\text{ft}^3/\text{s}$

$C_e$  = coeficiente de descarga (Anexos H y I)

$h_1$  = cabeza en el vertedero en ft

$h_{1e} = h_1 + k_h$

$\Theta$  = ángulo de la muesca en V

$K_h$  = es una función de  $\theta$  (Anexo J).

Este estudio midió los niveles del agua con transductores de presión [7].

A partir de la información de los métodos, técnicas de medición y sus características se realizó la siguiente tabla de ventajas y desventajas de los mismos.

**Tabla 2 Ventajas y desventajas métodos de medición.**

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Precipitación</b>		
Thiessen	Método simple, bajo porcentaje de error.	Discontinuidad entre el valor de un Polígono y el siguiente
Kriging	Obtención de la variación espacial de la lluvia, bajo porcentaje de error.	Relación con la topografía para disminuir la varianza de la distribución espacial de lluvia - mayor complejidad
<b>Evapotranspiración</b>		
Hargreaves & Samani y Penman-Monteith	Se obtienen valores más cercanos debido a la calibración de variables y uso de datos del páramo	Mayor complejidad y uso de equipos debido a que se exige medición de diferentes variables.
<b>Densidad Aparente</b>		
Método de laboratorio	Método Simple	Se necesita persona experimentada para la toma y manipulación de muestras
<b>Conductividad Hidráulica</b>		
Método de la barrena de hoyos invertida	Método Simple	Se debe cargar instrumentación para llevar a cabo el ensayo en campo
Método del permeámetro de cabeza contante	El muestreo lleva poco tiempo y es una ventaja en caso de realizarse en un lugar remoto	La manipulación de las muestras hasta llegar al laboratorio
<b>Infiltración</b>		
Por simulación	Método Simple	Se necesita equipo en el campo para realizar simulación de lluvia.
Anillo de infiltración	Método Simple, no se necesita gran equipo ni mayor personal de trabajo, bajo costo.	
<b>Contenido de materia orgánica</b>		
Pérdida por ignición	Método económico no requiere material químico y necesita pocas horas de mano de obra	Puede quedar sustancias húmicas resistentes a la oxidación.
Método de combustión humedad	Método de bajos costos, poco equipamiento	El contenido de iones y óxidos pueden interferir en la cuantificación de la materia orgánica
<b>Escorrentía</b>		
Coefficiente de escorrentía	Método Simple	Traslado de equipo al campo para simulación.
<b>Caudal</b>		
Kindsvater-Shen	Método Simple	Desplazamiento a lugar para medir nivel del agua o instalar equipos como transductores de presión.

### **3. PROPUESTA INICIO DE MONITOREO DE PARÁMETROS EN LA CUENCA DEL RIO JORDAN**

Como punto adicional a los objetivos del presente trabajo se realiza la siguiente propuesta para iniciar el monitoreo en la cuenca del río Jordán.

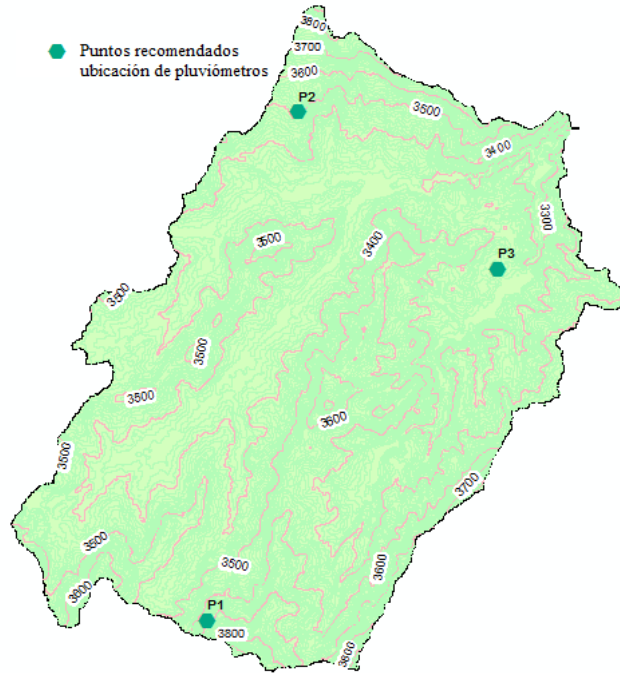
La cuenca del Río Jordán está ubicada al sur oriente del páramo de Berlín, jurisdicción municipio de Tona (Anexo K), con alturas que oscilan entre los 3000 y 4000 m, tiene un área de 13764.3 Ha y vegetación de pastos naturales, pajonales y áreas de cultivos transitorios, con suelos de baja capacidad de carga para uso potencial de conservación y con precipitaciones entre los 900 y 1600 mm, haciéndose mayores entre los 3500 y 3700 m de altura (Anexo L) [37].

Según las características observadas en la cuenca del Río Jordán, se recomienda iniciar el monitoreo con la medida de la precipitación para tener una apreciación acerca de la cantidad de agua que actualmente entra al sistema, se recomienda la instalación de 3 pluviómetros aproximadamente 1 por cada 50 km<sup>2</sup> [3], dos pluviómetros en las zonas de mayor altitud uno al sur y otro al norte de la cuenca entre los 3500 y 3700 m y el tercero a una altura alrededor de 3300 m (figura 9) para tener en cuenta la distribución espacial de la lluvia la cual puede variar debido a las características topográficas en estos ambientes.

En segunda medida se recomienda llevar a cabo estudios del suelo para conocer el estado de los mismos en las zonas de cultivos transitorios ubicados alrededor del río Jordán (Anexo M) para evaluar las consecuencias sobre estos y poder tomar medidas evitando efectos mayores. Inicialmente se puede dar una apreciación al estado del suelo superficial comparando tiempos de infiltración entre una zona de cultivos y una zona natural de páramos con el método del anillo de infiltración, en caso de que la superficie del suelo ya este agotada y se desee saber más acerca su estado se puede proceder a realizar estudios de conductividad hidráulica por el

método del permeámetro de cabeza contante o de barrena de hoyo invertido y densidad aparente con el método de laboratorio.

**Figura 9.** Recomendación de ubicación pluviómetros cuenca rio Jordán.

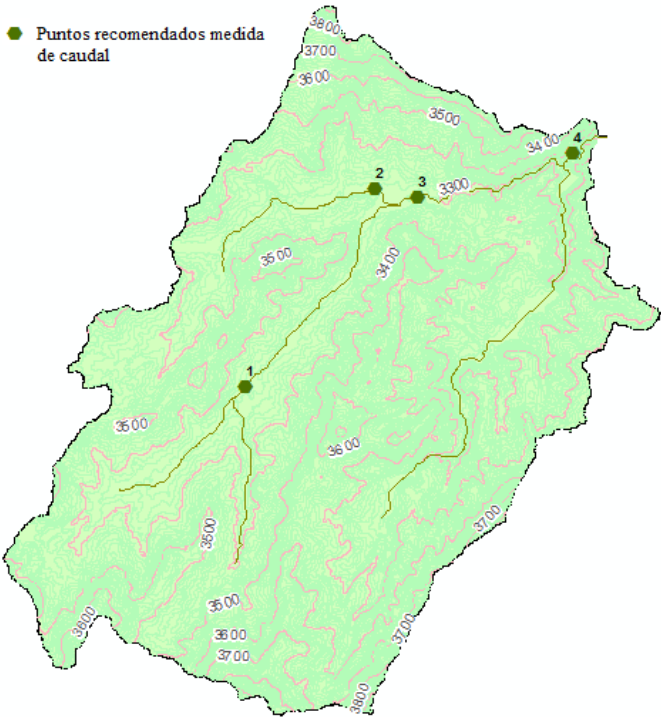


**Fuente:** Adaptado de [37]

En tercera medida sería importante evaluar la salida del caudal, la parte más húmeda de la cuenca se encuentra al sur (Anexo N), una de las medidas de los caudales se pueden hacer dentro de esta área en el punto 1 teniendo todavía gran área de escurrimiento, otra medida en la parte alta dentro del área más húmeda aguas abajo de la quebrada el cebollal, una de las de mayor área de aporte [37], un tercer punto con área de escurrimiento de la mayoría del área de la cuenca y un último punto para considerar la cantidad de caudal de salida de la cuenca en el punto 4 (Figura11). Así mismo, monitorear los caudales del río Jordán en distintas épocas del año puede dar señales a cerca del estado del ecosistema, pues los ríos alrededor

de páramos suelen tener un caudal base estable en la temporada seca, si los caudales son demasiado bajos en estas épocas podría haber una pérdida de la capacidad de la regulación del agua en el ecosistema.

**Figura 10.** Recomendación de los lugares para llevar a cabo la medida del caudal.



**Fuente:** Adaptado de [37].

Si se desea tener una visión acerca del comportamiento hidrológico se puede acceder a los datos de la página web del servidor NASA GIOVANNI, en caso de querer usar estos datos se debe tener en cuenta que subestiman la cantidad real de precipitación en las zonas de páramos.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo con el fin de revisar el estado del conocimiento del monitoreo de la cantidad de agua en páramos detectando los parámetros más usados para el seguimiento y métodos de medición de los mismos se concluye lo siguiente:

El monitoreo de páramos no ha sido un tema relevante de investigación, estos ambientes carecen de registros de información constante a través del tiempo lo que dificulta realizar modelamientos hidrológicos para llevar a cabo una adecuada gestión del recurso hídrico. Es de vital importancia conocer las variables concernientes a la cantidad de agua y su funcionamiento para proyectar posibles efectos a las intervenciones en el ambiente dando así uso sostenible a los recursos. Debido a que hay grandes precipitaciones este es uno de los parámetros claves dentro del monitoreo del agua y se da gracias a las características topográficas y medio ambientales como temperatura y presión. El suelo del páramo es elemento esencial en la regulación del agua debido a su capacidad para el almacenamiento de la misma. Por lo tanto, en la búsqueda de los parámetros más usados para el monitoreo de la cantidad de agua se encuentra en su mayoría los referentes a características del suelo como infiltración, conductividad hidráulica, densidad aparente y contenido de materia de orgánica.

Dado a la estrecha relación entre el agua y el suelo en el páramo el manejo inapropiado del suelo afecta directamente la cantidad de agua, debido a que las labores de labranza aumentan la compactación y reducen la infiltración, esto tiene como efecto el aumento de la escorrentía y la evapotranspiración, también variables claves en el monitoreo de la cantidad de agua. Cuando el suelo ya no cumple su papel regulador esta agua se dirige a los caudales de ríos a su alrededor y en época de lluvia puede existir riesgo de inundación y sequías en verano, afectando en gran manera al páramo sus ecosistemas en derredor y las poblaciones cercanas. Con el

conocimiento, monitoreo y gestión adecuada de las variables del páramo se pueden prevenir acontecimientos semejantes.

En el páramo es de vital importancia el estudio del suelo para investigaciones futuras con respecto al monitoreo de la cantidad de agua y también el estudio de la cobertura debido a que esta influye tanto en el contenido de agua en el suelo como en el proceso de evapotranspiración.

Debido a las características de los páramos los métodos para medir la evapotranspiración necesitan ser calibrados a las condiciones del ambiente, los métodos de medición de parámetros raramente tienen una adaptación especial al lugar de páramos. En la precipitación existen diversas tecnologías de métodos computacionales para el registro e interpolación de datos, pero se tiene la preferencia y mayor confiabilidad en el uso de pluviómetros e interpolación de datos convencional.

La presente revisión se realizó en su mayoría con información de páramos andinos hallada en bases de datos como scopus y science, por lo tanto puede que sus resultados en cuanto a parámetros más usados y técnicas de medición cambie con respecto a páramos en otros lugares del mundo o información de otras bases de datos.

## REFERENCIAS

- [1] F. A. P. L. V. Y. LA SOSTENIBILIDAD, “Protocolos elaborados para medir el impacto de las intervenciones del fondo agua por la vida y la sostenibilidad,” 2012.
- [2] J. Holden, L. Shotbolt, A. Bonn, T. P. Burt, P. J. Chapman, A. J. Dougill, E. D. G. Fraser, K. Hubacek, B. Irvine, M. J. Kirkby, M. S. Reed, C. Prell, S. Stagl, L. C. Stringer, A. Turner, and F. Worrall, “Environmental change in moorland landscapes,” *Earth-Science Rev.*, vol. 82, no. 1–2, pp. 75–100, May 2007.
- [3] W. Buytaert, R. Celleri, P. Willems, B. De Bièvre, and G. Wyseure, “Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes,” *J. Hydrol.*, vol. 329, no. 3, pp. 413–421, 2006.
- [4] W. Buytaert, R. Celleri, B. De Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers, and R. Hofstede, “Human impact on the hydrology of the Andean páramos,” *Earth-Science Rev.*, vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, Nov. 2006.
- [5] J. Espinosa and D. Rivera, “Variations in water resources availability at the Ecuadorian páramo due to land-use changes,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, no. 16, pp. 1–15, 2016.
- [6] D. Serrano Giné and R. Galárraga Sánchez, “El páramo andino: características territoriales y estado ambiental. Aportes interdisciplinarios para su conocimiento,” *Estud. Geográficos*, vol. 76, no. 278, pp. 369–393, Aug. 2015.
- [7] P. J. Crespo, J. Feyen, W. Buytaert, A. Bücken, L. Breuer, H.-G. Frede, and M. Ramírez, “Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador),” *J. Hydrol.*, vol. 407, no. 1, pp. 164–174, 2011.
- [8] C. P. Harden, J. Hartsig, K. a. Farley, J. Lee, L. L. Bremer, P. Crespo, R. Celleri, W. Buytaert, B. Ochoa, I. Cárdenas, V. Iñiguez, P. Borja, J. Feyen, and M. Cooper, “Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland

- Soils,” *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, vol. 103, no. 4, pp. 375–384, 2013.
- [9] R. Céleri and J. Feyen, “The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives,” *Mt. Res. Dev.*, vol. 29, no. 4, pp. 350–355, 2009.
- [10] C. A. M. Vallejo, “Efectos de diferentes tipos de vegetación sobre la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo en la Reserva Privada Paluguillo (Ecuador),” pp. 1–23, 2012.
- [11] A. Molina, G. Govers, V. Vanacker, E. Zeelmaekers, and F. Cisneros, “Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use,” *CATENA*, vol. 71, no. 2, pp. 357–370, 2007.
- [12] V. Chow, D. Maidment, and L. Mays, “Hidrología aplicada,” *Hidrología aplicada*. p. 575 pp, 1994.
- [13] E. Ward, W. Buytaert, L. Peaver, and H. Wheeler, “Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective,” *Adv. Water Resour.*, vol. 34, no. 10, pp. 1222–1231, 2011.
- [14] F. Domingo, L. Villagarcia, and A. Were, “¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución,” *Rev. científica y técnica Ecol. y medio Ambient.*, vol. 1, p. 15, 2003.
- [15] M. Reyes and F. J. Taguas, “Estimating soil bulk density with information metrics of soil texture,” *Geoderma*, vol. 287, pp. 66–70, 2017.
- [16] R. M. Lark, B. G. Rawlins, D. A. Robinson, I. Lebron, and A. M. Tye, “Implications of short-range spatial variation of soil bulk density for adequate field-sampling protocols: Methodology and results from two contrasting soils,” *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 65, no. 6, pp. 803–814, 2014.
- [17] W. Buytaert, B. De Bièvre, R. Celleri, F. Cisneros, G. Wyseure, and S. Deckers, “Comment on ‘Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes’ (Carol P. Harden, *Geomorphology* 79, 249–263),” *Geomorphology*, vol. 96, no. 1. pp. 239–242, 2008.
- [18] L. Donado, “Modelo de conductividad hidráulica en suelos,” p. 180, 2004.

- [19] B. F. Ochoa-Tocachi, W. Buytaert, B. De Bièvre, R. Céleri, P. Crespo, M. Villacís, C. A. Llerena, L. Acosta, M. Villazón, M. Guallpa, J. Gil-Ríos, P. Fuentes, D. Olaya, P. Viñas, G. Rojas, and S. Arias, “Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments,” *Hydrol. Process.*, vol. 30, no. 22, pp. 4074–4089, 2016.
- [20] J. Poulénard, P. Podwojewski, J.-L. Janeau, and J. Collinet, “Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning,” *CATENA*, vol. 45, no. 3, pp. 185–207, 2001.
- [21] F. Hernández and F. Triana, “Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del Páramo del Sumapaz.” 2009.
- [22] J. Poulénard, P. Podwojewski, J.-L. Janeau, and J. Collinet, “Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning,” *CATENA*, vol. 45, no. 3, pp. 185–207, 2001.
- [23] L. La Manna, C. Buduba, V. Alonso, M. Davel, C. Puentes, and J. Irisarri, “Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la Región Andino-Patagónica: Efectos de la vegetación y el tipo de suelo,” *Suelo*, vol. 25, no. 2, pp. 179–188, 2007.
- [24] A. Gallardo, “Geoestadística,” *Ecosistemas*, 2006.
- [25] S. Ly, C. Charles, and A. Degré, “Geostatistical interpolation of daily rainfall at catchment scale: The use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, no. 7, pp. 2259–2274, 2011.
- [26] C. dan Cheng, S. jen Cheng, J. chau Wen, and J. huang Lee, “Effects of Raingauge Distribution on Estimation Accuracy of Areal Rainfall,” *Water Resour. Manag.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–20, 2012.
- [27] Z. Shen, L. Chen, Q. Liao, R. Liu, and Q. Hong, “Impact of spatial rainfall variability on hydrology and nonpoint source pollution modeling,” *J. Hydrol.*, vol. 472, pp. 205–215, 2012.
- [28] K. E. Clark, M. A. Torres, A. J. West, R. G. Hilton, M. New, A. B. Horwath, J.

- B. Fisher, J. M. Rapp, A. Robles Caceres, and Y. Malhi, "The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 18, no. 12, pp. 5377–5397, 2014.
- [29] Nasa HearhData, "Nassa Giovanni." [Online]. Available: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- [30] E. C. Vega and J. C. Jara, "Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa Y Región Andina) del Ecuador," *Eng. Agrícola*, vol. 29, no. 3, pp. 390–403, Sep. 2009.
- [31] M. Cordova, G. Carrillo-Rojas, P. Crespo, B. Wilcox, and R. Celleri, "Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data Application to the Wet Paramo of Southern Ecuador," *Mt. Res. Dev.*, vol. 35, no. May, pp. 230–239, 2015.
- [32] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith, and W. Ab, "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56," pp. 1–15, 1998.
- [33] R. J. Oosterbaan and H. Nijland, "Determining the Saturated Hydraulic Conductivity," *Drainagem Princ. Appl.*, vol. 16, pp. 435–476, 1994.
- [34] W. Buytaert, G. Wyseure, B. De Bièvre, and J. Deckers, "The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador," *Hydrol. Process.*, vol. 19, no. 20, pp. 3985–3997, 2005.
- [35] U. S. Department of the Interior Bureau of water., "Water measurement manual.," p. 317, 2001.
- [36] G. Kulin and P. A. Compton, "Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow," *Natl. Bur. Stand.*, vol. Special Pu, no. 66, pp. 218–223, 1975.
- [37] J. Restrepo, C. A. Suárez, and M. Y. Álvarez, "Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales 'Páramo de Berlín,'" *Corporación Autónoma Reg. Para La Def. La Meseta Bucaramanga.*, p. 103, 2008.

- [38] J. Poulénard, P. Podwojewski, and A. J. Herbillon, “Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos,” in *Geoderma*, 2003, vol. 117, no. 3–4, pp. 267–281.
- [39] M. Vuille, B. Francou, P. Wagnon, I. Juen, G. Kaser, B. G. Mark, and R. S. Bradley, “Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future,” *Earth-Science Rev.*, vol. 89, no. 3, pp. 79–96, 2008.
- [40] W. Buytaert, V. Iñiguez, and B. De Bièvre, “The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 251, no. 1–2, pp. 22–30, Oct. 2007.
- [41] R. Giraldo Henao, *Introducción a la geoestadística*. 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

BUYTAERT, Wouter; CÉLLERI, Rolando; DE BIÈVRE, Bert; CISNEROS, Felipe; WYSEURE, Guido; DECKERS, Jozef; HOFSTEDE, Robert. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos," *Earth-Science Rev.*, vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, Nov. 2006.

BUYTAERT, Wouter; CELLERI, Rolando; WILLEMS, Patrick; DE BIÈVRE, Bert; WYSEURE, Guido. "Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes," *J. Hydrol.*, vol. 329, no. 3, pp. 413–421, 2006.

BUYTAERT, Wouter; IÑIGUEZ, Vicente; De BIÈVRE, Bert. "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo," *For. Ecol. Manage.*, vol. 251, no. 1–2, pp. 22–30, Oct. 2007.

CÉLLERI, Rolando; FEYEN, Jan. "The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives," *Mt. Res. Dev.*, vol. 29, no. 4, pp. 350–355, 2009.

CLARK, K. E.; TORRES, M. A.; WEST, A. J.; HILTON, R. G.; NEW, M. HORWATH, A. B.; FISHER, J. B.; RAPP, J. M.; ROBLES CACERES, A; MALHI, Y. "The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 18, no. 12, pp. 5377–5397, 2014.

CORDOVA, M; CARRILLO ROJAS, G; CRESPO, Patricio; WILCOX, B; CELLERI, Rolando. "Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating

Reference Evapotranspiration Using Limited Data Application to the Wet Paramo of Southern Ecuador,” *Mt. Res. Dev.*, vol. 35, no. May, pp. 230–239, 2015.

CRESPO, Patricio Javier; FEYEN, Jan; BUYTAERT, Wouter; BÜCKER, Amelie; BREUER, Lutz; FREDE, Hans-Georg; RAMÍREZ, Marco. “Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador),” *J. Hydrol.*, vol. 407, no. 1, pp. 164–174, 2011.

ESPINOSA, Jorge; RIVERA, Diego. “Variations in water resources availability at the Ecuadorian ´ramo due to land-use changes pa,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, no. 16, pp. 1–15, 2016.

HARDEN, Carol P; HARTSIG, James; FARLEY, Kathleen a; LEE, Jaehoon; BREMER, Leah L; CRESPO, Patricio; CÉLLERI, Rolando; BUYTAERT, Wouter; OCHOA, Boris; CÁRDENAS, Irene; IÑIGUEZ, Vicente; BORJA, Pablo; FEYEN, Jan; COOPER, Mendel. “Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils,” *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, vol. 103, no. 4, pp. 375–384, 2013.

LA MANNA, Ludmila; BUDUBA, Carlos; ALONSO, Virginia; DAVEL, Miguel; PUENTES, Carolina; IRISARRI, Jorge L. “Comparación de métodos analíticos para la determinación de materia orgánica en suelos de la Región Andino-Patagónica: Efectos de la vegetación y el tipo de suelo,” *Suelo*, vol. 25, no. 2, pp. 179–188, 2007.

MOLINA, Armando; GOVERS, Gerard; VANACKER, Veerle; ZEELMAEKERS, Edwin; CISNEROS, Felipe. “Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use,” *CATENA*, vol. 71, no. 2, pp. 357–370, 2007.

MORENO VALLEJO, Crithian. “Efectos de diferentes tipos de vegetación sobre la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo en la Reserva Privada

Paluguillo (Ecuador),” pp. 1–23, 2012.

OCHOA-TOCACHI, Boris F; BUYTAERT, Wouter; BIÈVRE, Bert De; CÉLLERI, Rolando; CRESPO, Patricio; VILLACÍS, Marcos; LLERENA, Carlos A; ACOSTA, Luis; VILLAZÓN, Mauricio; GUALLPA, Mario; GIL-RÍOS, Junior; FUENTES, Paola; OLAYA, Dimas; VIÑAS, Paúl; ROJAS, Gerver; ARIAS, Sandro. “Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments,” *Hydrol. Process.*, vol. 30, no. 22, pp. 4074–4089, 2016.

POULENARD, Jérôme; PODWOJEWSKI, Pascal; JANEAU, Jean-Louis; COLLINET, Jean J. “Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning,” *CATENA*, vol. 45, no. 3, pp. 185–207, 2001.

RESTREPO, Jorge; SUÁREZ, Carlos Alberto; ÁLVAREZ, Melva Yaneth. “Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales ‘Páramo de Berlín,’” *Corporación Autónoma Reg. Para La Def. La Meseta Bucaramanga.*, p. 103, 2008.

## ANEXOS

**ANEXO A.** Tabla porcentaje participación de autores en la literatura seleccionada.

Autor	%Porcentaje participación	Años	Instituciones	
Wouter Buytaert	39%	2006-2016	Division of Soil and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador
Rolando Céleri	28%	2006-2016	Hydraulics Laboratory, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador
Felipe Cisneros	17%	2006-2008	Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS), Rue d'Egmont 5, B-1000 Brussels, Belgium	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador
Bert De Bie`vre	22%	2006-2016	International Potato Center–CONDESAN, Proyecto Páramo Andino, Quito, Ecuador	Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador
Patricio Crespo	17%	2006-2016	Institute for Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig University of Giessen.Germany	Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente, DIUC, Universidad de Cuenca

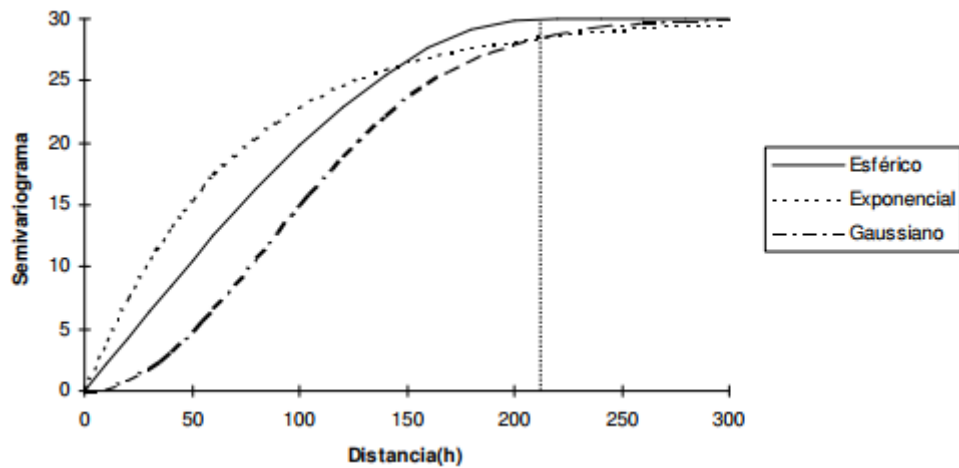
**ANEXO B.** Parámetros relacionados con la cantidad de agua en páramos hallados en la literatura.

<b>Parámetros</b>	<b>% de literatura en que aparece</b>	<b>Fuentes</b>
Precipitación	61%	[7], [13], [5], [8], [38], [28], [3], [39], [4],[40], [19].
Densidad aparente	39%	[7], [17], [5], [8], [38], [9], [10].
Conductividad hidráulica	22%	[7], [9], [4], [22].
Evapotranspiración	33%	[7], [9], [28], [4],[40],[31]
Infiltración	33%	[17], [9], [4], [22], [10], [19].
Temperatura	33%	[5], [39].
Humedad Aire	11%	[5], [39].
Humedad Suelo	6%	[8].
Saturación	11%	[5], [9].
Acido Húmico /Materia Orgánica /Carbono	33%	[8], [38], [11], [4], [22], [10].
Escorrentía	17%	[11], [4], [22].
Caudal	22%	[40], [7], [28], [19].

**ANEXO C.** Tabla métodos y técnicas de medición de parámetros

<b>Parámetros</b>	<b>Métodos y técnicas</b>	<b>Referencia</b>
<b>Precipitación</b>	Kriging universal	[3]
	Polígonos de Thiessen	[7], [3], [40].
<b>Evapotranspiración</b>	Modelo de Hargreaves & Samani (H-S)	[5].
	Penman-Monteith (FAO 56 PM)	[40].
<b>Densidad aparente del suelo</b>	Método de laboratorio	[8], [10]
<b>Conductividad hidráulica</b>	Método de barrena de hoyos invertida	[7], [4].
	Método del permeámetro de cabeza contante	[4].
<b>Infiltración</b>	Diferencia entre intensidad de lluvia y escorrentía	[22].
	Método de anillo de infiltración	[10].
<b>Contenido de materia orgánica</b>	Pérdida por ignición	[23]
	Método de Walkley-Black	[10]
<b>Escorrentía</b>	Coeficiente de Escorrentía	[11],[22].
<b>Caudal de descarga</b>	Relación Kindsvater-Shen	[7], [40]

#### ANEXO D. Ejemplo de un semivariograma <sup>1</sup>.



Las partes del semivariograma son las siguientes: La meseta, esta es la cota superior del semivariograma o cuando este inicia un comportamiento asintótico, el siguiente es el rango este dato muestra la distancia (h) hasta la cual un dato influye sobre el otro, de esta distancia en adelante no hay correlación entre los datos. Los datos de semivarianza generalmente se ajustan a los modelos esféricos exponencial y gaussiano, para el modelo esférico el rango es el valor de la distancia h y el los modelos exponencial y gaussiano el rango se encuentra a una distancia donde donde la semivarianza alcanza el 95% del valor de la meseta [41].

---

<sup>1</sup> R. Giraldo Henao, *Introducción a la geoestadística*. 2011

## ANEXO E. Valores de referencia para la radiación de Angot (Ra)<sup>2</sup>.

Radiación extra terrestre (Ra) expresada en evaporación equivalente en mm / día

Hemisferio norte												Lat	Hemisferio sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
3.80	6.10	9.40	12.70	15.80	17.10	16.40	14.10	10.90	7.40	4.50	3.20	50°	17.50	14.70	10.90	7.00	4.20	3.10	3.50	5.50	8.90	12.90	16.50	18.20
4.30	6.60	9.80	13.00	15.90	17.20	16.50	14.30	11.20	7.80	5.00	3.70	48	17.60	14.90	11.20	7.50	4.70	3.50	4.00	6.00	9.30	13.20	16.60	18.20
4.9	7.10	10.20	13.3	16.00	17.20	16.60	14.5	11.5	8.30	5.50	4.30	46	17.70	15.10	11.50	7.90	5.20	4.00	4.40	6.50	9.70	13.40	16.70	18.30
5.30	7.60	10.60	13.70	16.10	17.20	16.60	14.70	11.90	8.70	6.00	4.70	44	17.80	15.30	11.90	8.40	5.70	4.40	4.90	6.90	10.20	13.70	16.70	18.30
5.90	8.10	11.00	14.00	16.20	17.30	16.70	15.00	12.20	9.10	6.50	5.20	42	17.80	15.50	12.20	8.80	6.10	4.90	5.40	7.40	10.60	14.00	16.80	18.30
6.40	8.60	11.40	14.30	16.40	17.30	16.70	15.20	12.50	9.60	7.00	5.70	40	17.90	15.70	12.50	9.20	6.60	5.30	5.90	7.90	11.00	14.20	16.90	18.30
6.90	9.00	11.80	14.50	16.40	17.20	16.70	15.30	12.80	10.00	7.50	6.10	38	17.90	15.80	12.80	9.60	7.10	5.80	6.30	8.30	11.40	14.40	17.00	18.30
7.40	9.40	12.10	14.70	16.40	17.20	16.70	15.40	13.10	10.60	8.00	6.60	36	17.90	16.00	13.20	10.10	7.50	6.30	6.80	8.80	11.70	14.60	17.00	18.20
7.90	9.80	12.40	14.80	16.50	17.10	16.80	15.50	13.40	10.80	8.50	7.20	34	17.80	16.10	13.50	10.50	8.00	6.80	7.20	9.20	12.00	14.90	17.10	18.20
8.30	10.20	12.80	15.00	16.50	17.00	16.80	15.60	13.60	11.20	9.00	7.80	32	17.80	16.20	13.80	10.90	8.50	7.30	7.70	9.60	12.40	15.10	17.20	18.10
8.80	10.70	13.10	15.20	16.50	17.00	16.8*	15.70	13.90	11.60	9.50	8.30	30	17.80	16.4	14.00	11.30	8.90	7.80	8.10	10.10	12.70	15.30	17.30	18.10
9.30	11.10	13.40	15.30	16.50	16.80	16.70	15.70	14.10	12.00	9.90	8.80	28	17.70	16.40	14.30	11.60	9.30	8.20	8.60	10.40	13.00	15.40	17.20	17.90
9.80	11.50	13.70	15.30	16.40	16.70	16.60	15.70	14.30	12.30	10.30	9.30	26	17.60	16.40	14.40	12.00	9.70	8.70	9.10	10.90	13.20	15.50	17.20	17.80
10.20	11.90	13.90	15.40	16.40	16.60	16.50	15.80	14.50	12.60	10.70	9.70	24	17.50	16.50	14.60	12.30	10.20	9.10	9.50	11.20	13.40	15.60	17.10	17.70
10.70	12.30	14.20	15.50	16.30	16.40	16.40	15.80	14.60	13.00	11.10	10.20	22	17.40	16.50	14.80	12.60	10.60	9.60	10.00	11.60	13.70	15.70	17.00	17.50
11.20	12.70	14.40	15.60	16.30	16.40	16.30	15.90	14.80	13.30	11.60	10.70	20	17.30	16.50	15.00	13.00	11.00	10.00	10.40	12.00	13.90	15.80	17.00	17.40
11.60	13.00	14.60	15.60	16.10	16.10	16.10	15.80	14.90	13.60	12.00	11.10	18	17.10	16.50	15.10	13.20	11.40	10.40	10.80	12.30	14.10	15.80	16.80	17.10
12.00	13.30	14.70	15.60	16.00	15.90	15.90	15.70	15.00	13.90	12.40	11.60	16	16.90	16.40	15.20	13.50	11.70	10.80	11.20	12.60	14.30	15.80	16.70	16.80
12.40	13.60	14.90	15.70	15.80	15.70	15.70	15.70	15.10	14.10	12.80	12.00	14	16.70	16.40	15.30	13.70	12.10	11.20	11.60	12.90	14.50	15.80	16.50	16.60
12.80	0.55	15.10	15.70	15.70	15.50	15.50	15.60	15.20	14.40	13.30	12.50	12	16.60	16.30	15.40	14.00	12.50	11.60	12.00	13.20	14.70	15.80	16.40	16.50
13.20	14.20	15.30	15.70	15.50	15.30	15.30	15.50	15.30	14.70	13.60	12.90	10	16.40	16.30	15.50	14.20	12.80	12.00	12.40	13.50	14.80	15.90	16.20	16.20
13.60	14.50	15.30	15.60	15.3	15.00	15.10	15.40	15.30	14.80	13.90	13.30	8	16.10	16.10	15.50	14.40	13.10	12.40	12.70	13.70	14.90	15.80	16.00	16.00
13.90	14.80	15.40	15.40	15.10	14.70	14.90	15.20	15.30	15.00	14.20	13.70	6	15.80	16.00	15.60	14.70	13.40	12.80	13.10	14.00	15.00	15.70	15.80	15.70
14.30	15.00	15.50	15.50	14.90	14.40	14.60	15.10	15.30	15.10	14.50	14.10	4	15.50	15.80	15.60	14.90	13.80	13.20	13.40	14.30	15.10	15.60	15.50	15.40
14.70	15.30	15.60	15.30	14.60	14.20	14.30	14.90	15.30	15.30	14.80	14.40	2	15.30	15.70	15.70	15.10	14.10	13.50	13.70	14.50	15.20	15.50	15.30	15.10
15.00	15.50	15.70	15.30	14.40	13.90	14.10	14.80	15.30	15.40	15.10	14.80	0	15.00	15.50	15.70	15.30	14.40	13.90	14.10	14.80	15.30	15.40	15.10	14.80

<sup>2</sup> J. Doorenbos and W. O. Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements," FAO Irrig. Drain. Pap., vol. 24, p. 144, 1977.

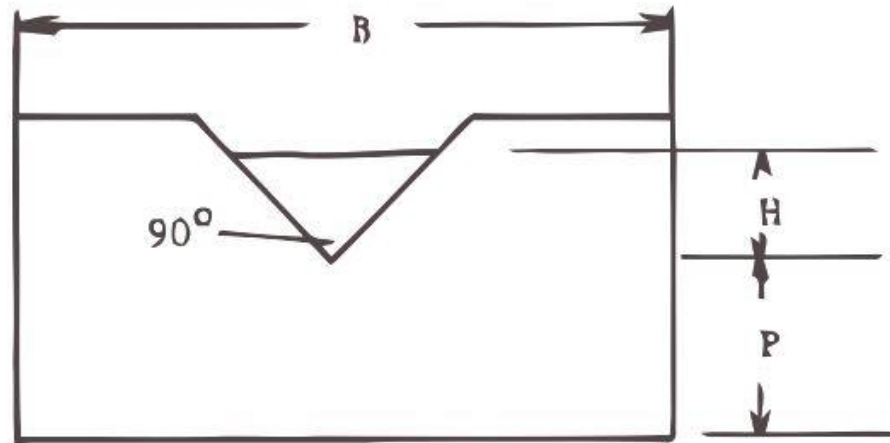
**ANEXO F.** Tabla de duración diaria media del máximo de horas de sol posible para diferentes meses y latitudes (N) <sup>3</sup>

Duración media diaria del máximo de horas de sol posibles para diferentes meses y latitudes

Lat. Norte	Ene	Febr	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lat. Sur	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Febr	Mar	Abril	May	Jun
50.00	8.50	10.10	11.80	13.80	15.40	16.30	15.90	14.50	12.70	10.80	9.10	8.10
48.00	8.80	10.20	11.80	13.60	15.20	16.00	15.60	14.30	12.60	10.90	9.30	8.30
46.00	9.10	10.40	11.90	13.50	14.90	15.70	15.40	14.20	12.60	10.90	9.50	8.70
44.00	9.30	10.50	11.90	13.40	14.70	15.40	15.20	14.00	12.60	11.00	9.70	8.90
42.00	9.40	10.60	11.90	13.40	14.60	15.20	14.90	13.90	12.60	11.10	9.80	9.10
40.00	9.60	10.70	11.90	13.30	14.40	15.00	14.70	13.70	12.50	11.20	10.00	9.30
35.00	10.10	11.00	11.90	13.10	14.00	14.50	14.30	13.50	12.40	11.30	10.30	9.80
30.00	10.40	11.10	12.00	12.90	13.60	14.00	13.9*	13.20	12.40	11.50	10.60	10.20
25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90
15.00	11.30	11.60	12.00	12.50	12.80	13.00	12.90	12.60	12.20	11.80	11.40	11.20
10.00	11.60	11.80	12.00	12.30	12.60	12.70	12.60	12.40	12.10	11.80	11.60	11.50
5.00	11.80	11.90	12.00	12.20	12.30	12.40	12.30	12.30	12.10	12.00	11.90	11.80
0.00	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10

<sup>3</sup> J. Doorenbos and W. O. Pruitt, "Guidelines for predicting crop water requirements," FAO Irrig. Drain. Pap., vol. 24, p. 144, 1977.

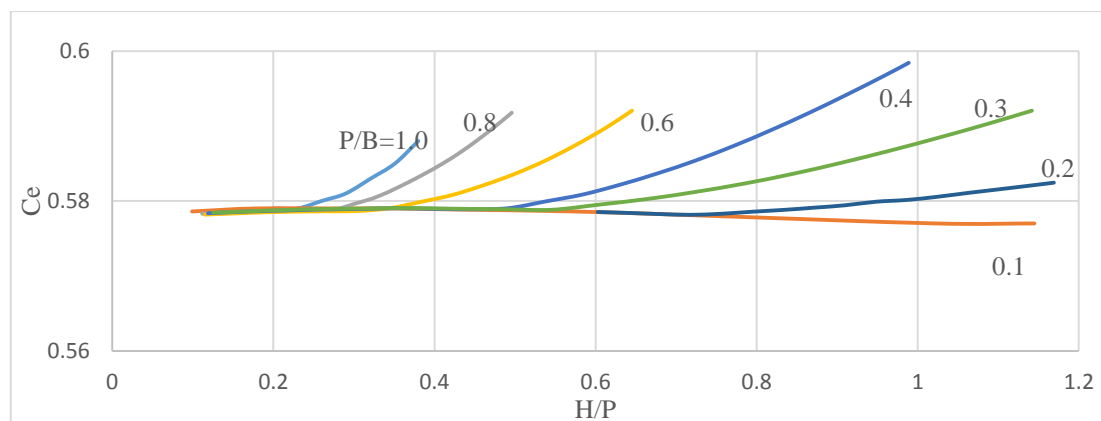
**ANEXO G.** Imagen Vertedero muesca en  $v^4$



---

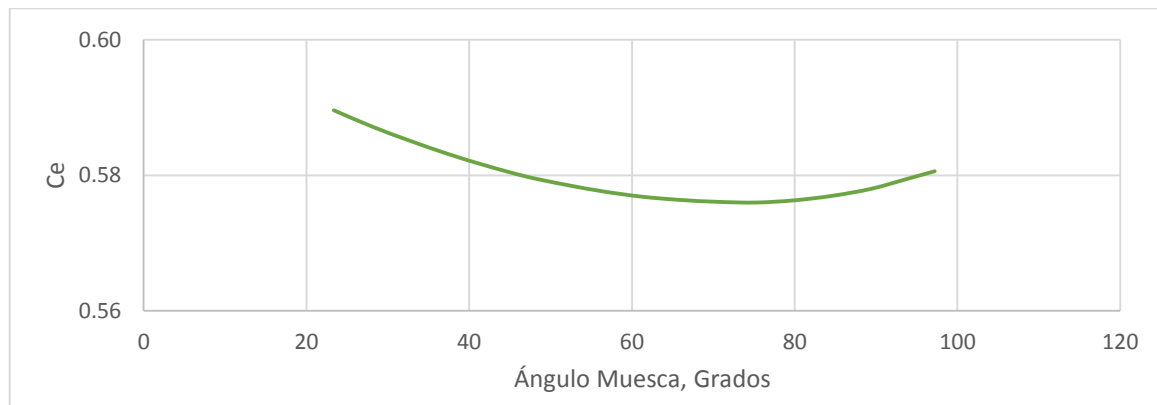
<sup>4</sup> G. Kulin and P. A. Compton, "Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow," *Natl. Bur. Stand.*, vol. Special Pu, no. 66, pp. 218–223, 1975.

**ANEXO H. Valores de  $C_e$  para  $\theta = 90^\circ$ <sup>5</sup>**



<sup>5</sup> G. Kulin and P. A. Compton, "Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow," *Natl. Bur. Stand.*, vol. Special Pu, no. 66, pp. 218–223, 1975.

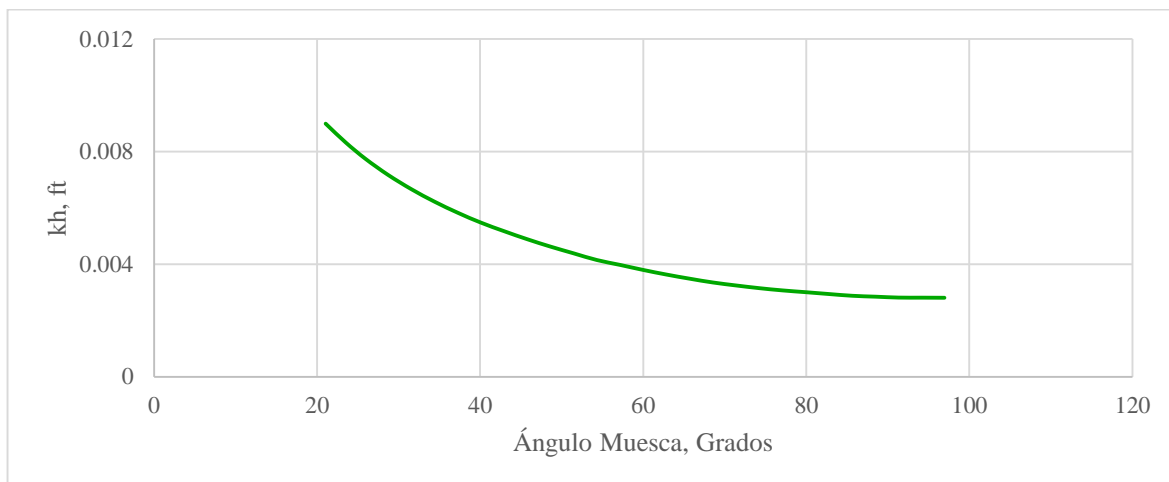
**ANEXO I. Valores de  $C_e$  para cualquier valor de  $\theta$  <sup>6</sup>**



---

<sup>6</sup> G. Kulin and P. A. Compton, "Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow," *Natl. Bur. Stand.*, vol. Special Pu, no. 66, pp. 218–223, 1975.

**ANEXO J.** Factor de corrección  $k_h$  para muescas en V de cualquier ángulo para la relación Kindsvater-Shen<sup>7</sup>

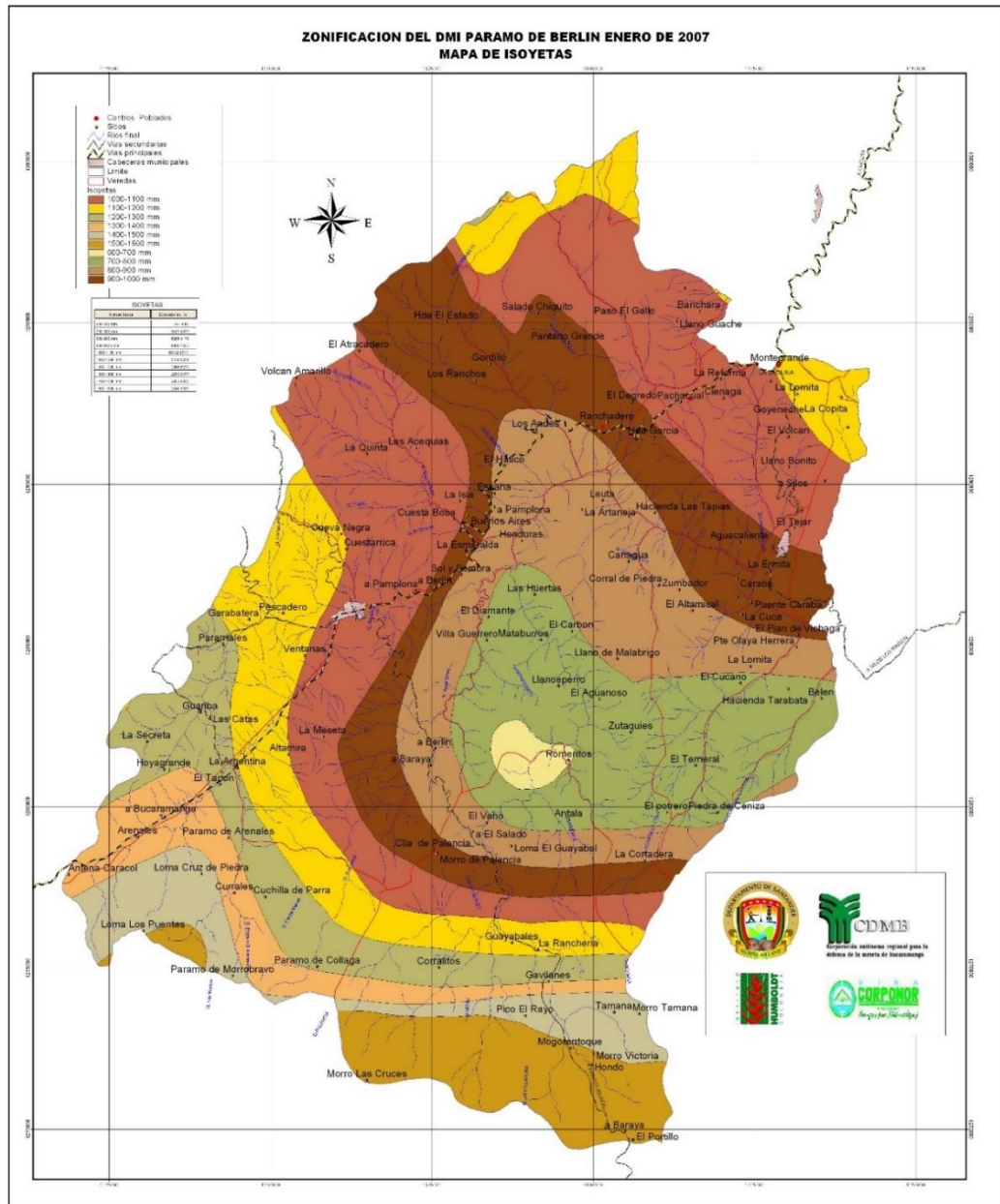


---

<sup>7</sup> G. Kulin and P. A. Compton, "Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow," *Natl. Bur. Stand.*, vol. Special Pu, no. 66, pp. 218–223, 1975.

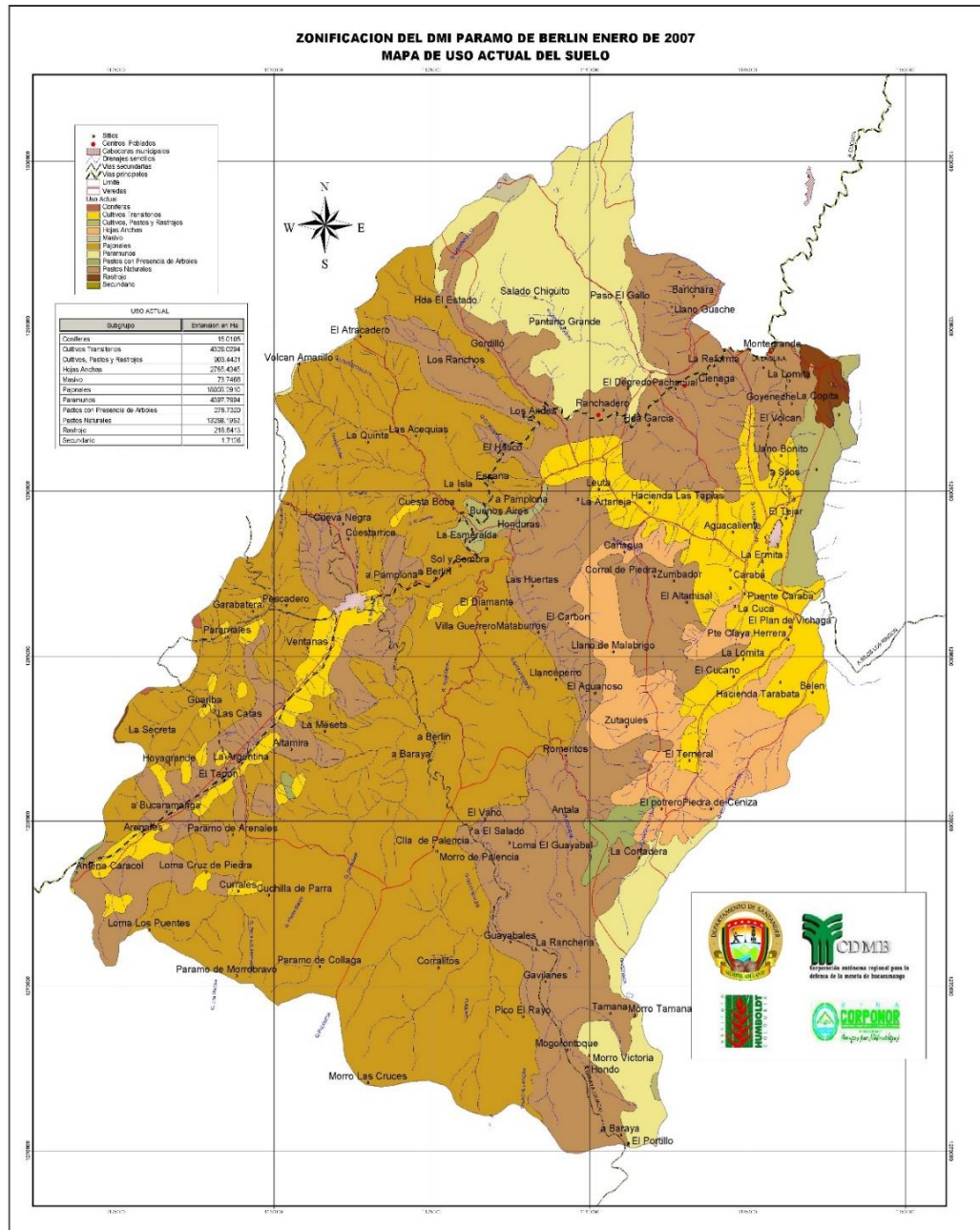


ANEXO L. Mapa isoyetas 2007<sup>9</sup>.



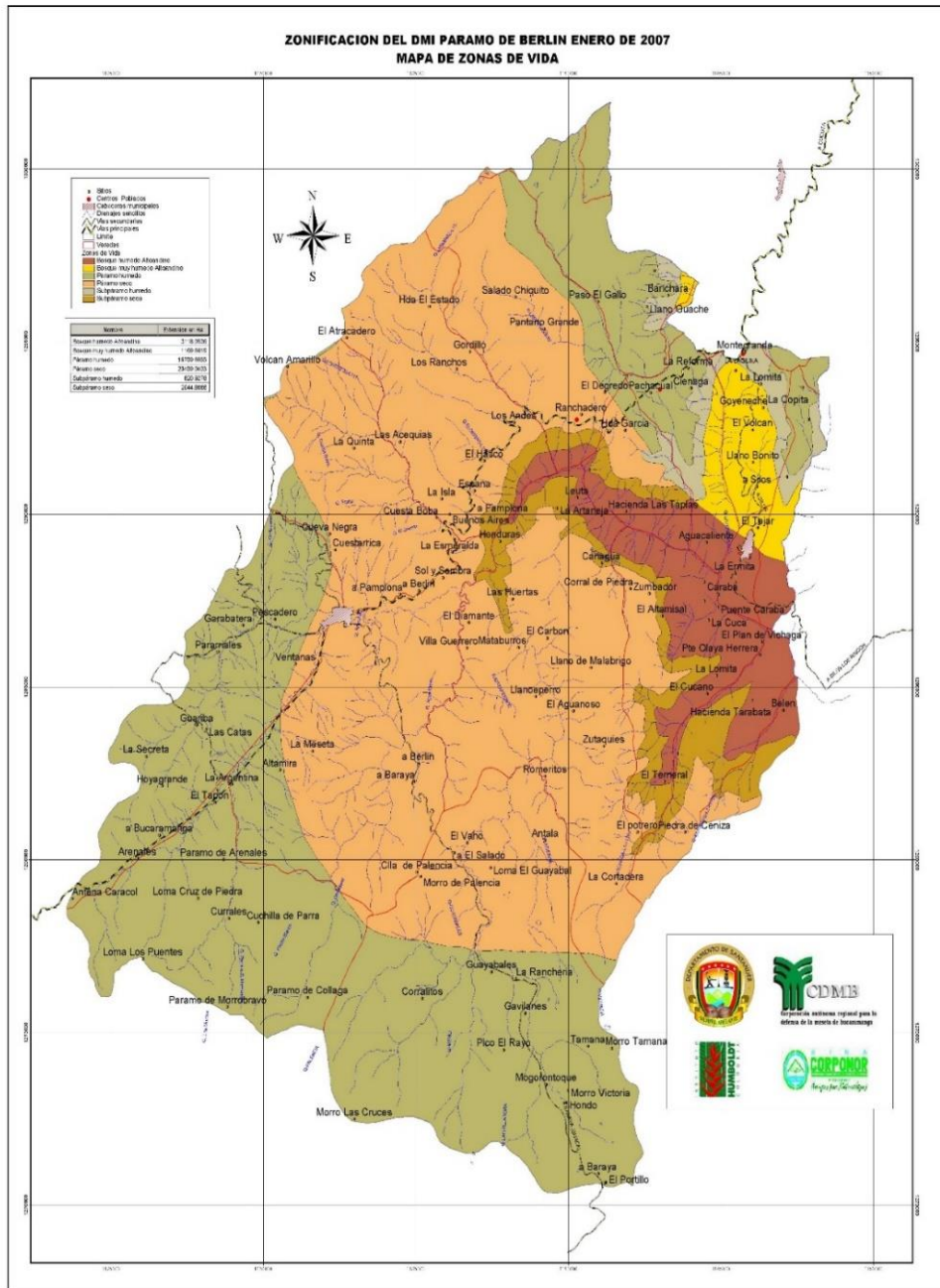
<sup>9</sup> J. Restrepo, C. A. Suárez, and M. Y. Álvarez, “Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales ‘Páramo de Berlin,’” *Corporación Autónoma Reg. Para La Def. La Meseta Bucaramanga.*, p. 103, 2008.

## ANEXO M. Mapa usos de suelo<sup>10</sup>.



<sup>10</sup> J. Restrepo, C. A. Suárez, and M. Y. Álvarez, “Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales ‘Páramo de Berlin,’” *Corporación Autónoma Reg. Para La Def. La Meseta Bucaramanga.*, p. 103, 2008.

ANEXO N. Mapa Zonas de vida nivel de humedad<sup>11</sup>.



<sup>11</sup> J. Restrepo, C. A. Suárez, and M. Y. Álvarez, “Plan integral de manejo del Distrito de Manejo Integrado de los recursos naturales ‘Páramo de Berlín,’” *Corporación Autónoma Reg. Para La Def. La Meseta Bucaramanga.*, p. 103, 2008.