

## **Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la oferta hídrica. Caso de estudio microcuenca del río Blanco, páramos del Nevado Cayambe, Ecuador.**

**Ricardo Valencia<sup>1</sup>, Dr. David Serrano<sup>2,4</sup>, Remigio Galárraga-Sánchez, Ph.D.<sup>3</sup>**

1 Estudiante, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador; email: rvalencia989@gmail.com

2 Profesor lector, Departamento de Geografía, Universidad Rovira i Virgili, c/ Joanot Martorell, 15, 43480 Vila-seca, Tarragona, España; email: david.serrano@urv.cat

3 Profesor principal, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador; email: remigio.galarraga@epn.edu.ec

4 Pasante Prometeo Senescyt 2013, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, IQuito, Ecuador

**RESUMEN:** *El desarrollo económico de las zonas aledañas al Nevado Cayambe (Pichincha, Ecuador) ha puesto de manifiesto una presión social sobre los recursos naturales, en especial sobre el agua, la cual en parte proviene de los deshielos del nevado. El estudio evalúa las implicaciones hidrológicas a partir de cambios en la ocupación del suelo, utilizando fotografías aéreas y ortofotomapas a escala detallada. En cuanto a datos hidro meteorológicos, se emplean valores mensuales de precipitación (1976 - 2010), caudales medios mensuales de estaciones hidrológicas, y de autorizaciones y concesiones de uso de agua en el área de estudio. A partir de esta información y junto con datos de uso y tipos del suelo se obtienen y validan los coeficientes de escorrentía. Los coeficientes obtenidos se emplean en un modelo de simulación Oferta-Demanda, que se implementa en el sistema de información geográfica ArcGIS, para obtener el estrés hídrico actual en los distintos tramos del río Blanco. Los principales resultados obtenidos se relacionan con el incremento de áreas de cultivo hacia las partes altas de las cuencas, las cuales introducen modificaciones significativas en la circulación de aguas del páramo.*

**Palabras clave:** *Páramo, uso de suelo, estrés hídrico, cultivos, Cayambe.*

**ABSTRACT:** *The economic development of the areas near the Cayambe Icecap (Pichincha, Ecuador) has revealed social and human pressure on natural resources, especially on water, which partly comes from melting of the Cayambe Icecap. The study assesses the hydrological implications that have occurred from changes in land use by using aerial photographs and detailed scale orthophoto. As for hydrometeorological data monthly precipitation values (1976 - 2010), monthly flows of hydrological stations, and authorizations and concessions for water use in the study area are used. From this information and with land use and soil type data runoff coefficients are obtained and validated. These coefficients are used in a Supply-Demand simulation model, which is implemented in ArcGIS to obtain current water stress in different parts along the river. The main results are related to the increase of cultivated areas toward the upper part of the basin, which introduce significant changes in the circulation of water in the high lands (páramos).*

**Keywords:** *High Lands, Land use, Hydric Stress, crops, Cayambe.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los recursos hídricos ha sido puesta de manifiesto en distintas ocasiones, haciéndose referencia tanto a su disponibilidad como a su calidad y aprovechamiento [1] [2] [3]. Su distribución a nivel mundial es poco uniforme. Según la OMS [4] para el 2009 la escasez de agua afectaba a todos los continentes y a cuatro de cada diez personas en el mundo. Se prevé que para 2025 cerca de 2000 millones de personas vivirán en países o en regiones con escasez de agua, donde los recursos hídricos por persona estarán por debajo de los 500m<sup>3</sup> anuales recomendados por la OMS [4]. Esta escasez, unida a una creciente demanda vinculada a fines agrícolas y ganaderos, consumo humano o generación de energía, entre otros, constituye una buena muestra de su importancia y significado social y ecológico [5].

Uno de los aspectos de mayor importancia ambiental del páramo andino es su elevada capacidad para regular el agua. La evapotranspiración en estos ambientes se ha estimado entre 1 y 1,5 mm/día [6]. Este hecho, unido a los elevados volúmenes de precipitación, hacen que el páramo sea claramente excedentario en agua [7], y nutra las cabeceras de las principales cuencas hidrográficas. En países como Ecuador, por ejemplo, las aguas superficiales abastecen el 98% del agua de riego [3]. Los cambios en la ocupación del suelo y en las actividades económicas afectan de manera directa estas dinámicas hídricas.

El objetivo de esta investigación es detectar el grado de estrés hídrico del río Blanco, en la vertiente occidental del nevado Cayambe. Este sector es representativo del páramo ecuatoriano, y no solo da buena muestra de los elementos de orden natural que allí se encuentran sino que también es definitorio de las nuevas dinámicas sociales y económicas que en él se desarrollan. Para ello se parte de considerar la ocupación del suelo, la disponibilidad de recursos hídricos y su aprovechamiento, utilizando como fuente de información datos públicos con carácter oficial y metodologías de probada validez en contextos similares.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se desarrolla en la microcuenca del río Blanco (MRB), situada en la vertiente occidental del nevado Cayambe (0°1' 28''N, 77° 59' 17''W) en el sector norte de los Andes ecuatorianos a unos 60 km de la ciudad de Quito (Figura 1).

La cuenca de estudio tiene una superficie de 3,320.40ha, dispuestas en un valle encajado de poco más de 20km de longitud y algo menos de 3,5km de amplitud en su punto



Figura 1. Fotografía de la parte alta de la MRB

más ancho. La parte alta de la cuenca coincide con la cumbre del Cayambe, a una cota de 5,760 msnm, y la parte baja con el desagüe del río Blanco en el río Granobles, que más tarde drena en el río Pisque. La disposición general de la cuenca es oeste-este, si bien la magnitud del relieve propicia que las laderas tengan una orientación predominante hacia el sur y hacia el norte. Los materiales predominantes en la cuenca son depósitos volcánicos cuaternarios [8] que generan andosoles de más de diez metros de profundidad. En la parte alta de la cuenca predominan cubiertas de páramo herbáceo y arbustivo, en la parte media potreros y cultivos al aire libre y en la parte baja cultivos en invernadero. El tramo final del río se encuentra en los extremos de la población Cayambe, que en 2010 tenía poco más de 85000 habitantes [9]. Las principales actividades económicas se centran en la ganadería y la agricultura. En los últimos años se ha experimentado un ascenso muy importante del cultivo de flores bajo invernadero [10], hecho que ha ido acompañado de graves implicaciones ambientales.

El nevado Cayambe, finalmente, presenta la singularidad añadida de ser uno de los pocos volcanes equinociales cubierto por hielos permanentes, aparte de ser también, el punto más elevado de la tierra cruzado por la línea ecuatorial [11].

## 3. METODOLOGÍA

La información relativa a ocupación del suelo se obtuvo mediante foteointerpretación. Se trabajó con datos del año 2013, 2002 y 1975. Para el período inicial se emplearon fotografías aéreas a escala 1:5.000, proporcionadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Para el período final se trabajó con imágenes georeferenciadas de EarthGlobe. Para ambos casos se siguió una digitalización en pantalla, empleando una escala de análisis cercana 1:2.500, hecho que proporciona validez contrastada a 1:10.000. El software utilizado fue ArcGis 9.3, ©ESRI. Se consideraron diez categorías de uso del suelo: nieve/hielo, suelo desnudo/roca, cuerpo de agua, páramo herbáceo, páramo arbustivo, potrero, plantación forestal, cultivo al aire libre, invernadero y

superficie edificada. La categoría cuerpo de agua se encontraba ausente en las imágenes del período inicial. Todas las categorías fueron validadas con observaciones de campo. La comparación de datos se realizó mediante el siguiente procedimiento (1):

$$t = 1 - [1 - (S1 - S2/S1)]^{1/n} \quad (1)$$

donde  $t$  es la tasa de cambio,  $S1$  es la ocupación natural al inicio del periodo,  $S2$  la ocupación natural al final del periodo y  $n$  el número de años comprendido en el análisis.

El análisis hidrológico se realizó empleando datos mensuales de precipitación, desde 1976 a 2010 (Tabla 1), datos de caudales medios mensuales de estaciones hidrológicas (Tabla 1) y datos de captaciones, proporcionados por la Secretaría Nacional del Agua (sector medio y bajo de la cuenca), y la organización Pueblo Kayambi (parte alta de la cuenca). Las series de precipitación se rellenaron y homogeneizaron. El relleno se realizó empleando el modelo de correlación-regresión; en la homogeneización se emplearon curvas de dobles masas y la prueba de rachas, tanto para valores mensuales como anuales. Con las series de datos completas se obtuvieron las precipitaciones mensuales multianuales para cada estación. Estos datos se interpolaron para obtener tanto la precipitación mensual como anual en toda el área de estudio. Los resultados obtenidos se georeferenciaron y se expresaron en 13 mapas de precipitación. El uso de la precipitación mensual multianual da como resultado que cualquier cambio en los caudales generados por el modelo sea originado por la variación de uso y cobertura del suelo únicamente [12], debido a que no hay una diferenciación anual de la precipitación. El Modelo Oferta-Demanda y los caudales de estaciones hidrológicas se obtuvieron del trabajo de De Bièvre et al. [13] para la hoya de Quito. Mediante el software ArcGis se generó un modelo de caudales medios mensuales para cada una de las hidrozonas detectadas. Una hidrozona es una región de respuesta hidrológica homogénea, es decir con procesos de escurrimiento, intercepción, evapotranspiración e infiltración similares. El modelo aplicado proporciona caudales medios y observados el 80% del tiempo, inclusive considerando la escorrentía proveniente de glaciares [13], para las distintas hidrozonas. Para el modelamiento se ajustaron las categorías de uso establecidas, simplificando "páramo herbáceo" a "páramo" y "páramo arbustivo" a "bosques andinos remanentes y bosques secundarios", según los requerimientos del modelo. Las categorías finales fueron: nieve o hielo, páramo, bosques andinos remanentes y bosques secundarios, agrícola, invernaderos, pastos, plantaciones forestales, zonas erosionadas y zonas urbanas. El cálculo de caudales medios mensuales producidos por cada hidrozona (con excepción del glaciar) se realizó mediante la siguiente ecuación (2) [13]:

$$Q_i = CP_i X_0 + CP_{i-1} X_1 + CP_{i-2} X_2 + CP_{i-3} X_3 \quad (2)$$

donde  $Q_i$  = caudal medio mensual del  $i$ -ésimo mes que aporta la hidrozona (mm);  $P_i$  = precipitación promedia mensual en la

hidrozona para el  $i$ -ésimo mes (mm);  $C$  = coeficiente de escorrentía en la hidrozona (mensual);  $X_0$  = coeficiente de ponderación de la precipitación del mes  $i$ ;  $X_1$  = Coeficiente de ponderación de la precipitación del mes  $i-1$ ;  $X_2$  = Coeficiente de ponderación de la precipitación del mes  $i-2$ ;  $X_3$  = Coeficiente de ponderación de la precipitación del mes  $i-3$ . El coeficiente de escorrentía ( $C$ ) y los de ponderación de la precipitación brindan valores entre 0 y 1, éstos últimos deben sumar entre sí 1, aunque según las características de cada hidrozona los valores de ponderación pueden ser iguales a cero. Los coeficientes de escorrentía proporcionan la fracción de agua de precipitación que escurre, produciendo el flujo superficial y subsuperficial; así, implícitamente, se considera la evapotranspiración. Ello se debe a que los procesos de evaporación se dan principalmente en la parte de agua retenida en la superficie de las plantas, que no escurre ni infiltra, mientras que en la transpiración de las plantas éstas absorben agua del suelo, que no llega a formar parte de la escorrentía. Por tal motivo los coeficientes de escurrimiento se encuentran tomados en cuenta de forma indirecta en los procesos de evapotranspiración.

El cálculo del caudal producido por el glaciar se realiza empleando la precipitación media anual y un coeficiente de deshielo particular para cada mes, según la fórmula (3) [13]:

$$E_i = y_i * P_{anual} \quad (3)$$

Donde  $E_i$  = escorrentía media mensual del mes  $i$  (mm);  $y_i$  = coeficiente de deshielo en el mes  $i$ ;  $P_{anual}$  = precipitación media anual (mm).

Los caudales totales mensuales de la cuenca se obtuvieron al sumar los aportes de la parte glaciar, los aportes de la parte no glaciar, y los retornos de riego (Eficiencia del 50%).

Los caudales totales proporcionados por el modelo se contrastan con los caudales naturales obtenidos a partir de: los caudales medidos en las estaciones hidrológicas, los caudales trasvasados, y los caudales captados. Una vez obtenido el caudal natural se calcula la escorrentía, con un 80% de probabilidad de excedencia, según la fórmula (4) [13]:

$$E_{i80\%} = k_i * E_i \quad (4)$$

Donde  $E_{i80\%}$  = escorrentía con 80% de probabilidad de excedencia del mes  $i$ ;  $k_i$  = escorrentía media del mes;  $E_i$  = coeficiente del mes  $i$ .

El valor de escorrentía que puede ser superado el 80% del tiempo se define como una parte de la escorrentía media del mes  $i$ . Por lo que  $k_i$  puede estar en valores entre 0 y 0,99. Tomando en cuenta las características de regulación propias de cada hidrozona se puede expresar que:

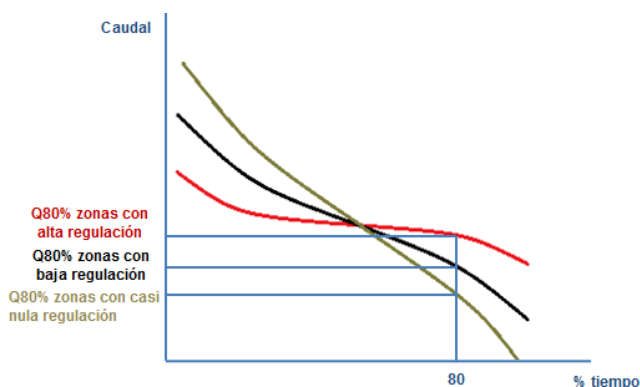
- Para las zonas con mayor regulación de caudales como son el bosque, el páramo, plantación forestal y los

glaciares, el coeficiente  $k_i$  adopta valores superiores. Como se puede apreciar en la Figura 2, la curva presenta una menor pendiente, lo que indica que el caudal aportante el 80 % del tiempo es superior a otro con menor regulación.

- Para las zonas con baja regulación de caudales como pasto, agrícola o invernadero, se tiene una gráfica con una pendiente más elevada (Figura 2), ya que al no presentar una buena regulación de caudales, en el momento en que se produce un evento de precipitación intenso el caudal aportante en estas zonas es alto. Ello se refleja en el Q80%, que es menor en comparación con las zonas con buena regulación hídrica.
- Finalmente para las zonas con casi nula regulación de caudales, como áreas erosionadas y urbano, el Q80% es muy cercano a cero.

Por lo antes mencionado se establecen tres rangos de valores para los diferentes  $k_i$ .

- Para las zonas con buena regulación, el valor  $k_i$  puede estar entre 0,60 y 0,95,
- Para las zonas con baja regulación hídrica, el valor  $k_i$  puede estar entre 0,3 y 0,6; y
- Para las zonas con casi nula regulación de caudales el valor  $k_i$  puede estar entre 0,05 y 0,3.



Realizado por: Ricardo Valencia Gudiño

Figura 2. Curvas de duración de caudales para zonas con características diferentes.

Los coeficientes de escorrentía ( $C$ ) se modificaron dentro de un rango determinado de acuerdo con la investigación bibliográfica (Tabla 2). Los coeficientes de ponderación ( $X_0, X_1, X_2, X_3$ ), se obtuvieron considerando la capacidad de regulación de cada hidrozona. De tal manera que mientras mayor fuera la capacidad de regulación de la hidrozona en análisis  $X_0, X_1, X_2$ , y  $X_3$  se pueden tener valores distintos de 0, y al contrario, si una hidrozona no tiene una gran capacidad de regulación,  $X_1, X_2$  o  $X_3$  pueden ser igual a 0.

Una vez obtenidos los coeficientes se estimó la escorrentía media y la escorrentía 80% de excedencia en el tiempo, con

el objetivo de cuantificar la oferta natural (producción natural de agua). De la oferta natural se restó las captaciones acumuladas, dando como resultado las distintas categorías de estrés hídrico para diferentes tramos del río. Al no contar con datos de captaciones de 2002, no fue posible determinar el estrés hídrico para ese año, sino únicamente para el 2013.

Para determinar el estrés hídrico de la microcuenca del río Blanco, se adaptaron los criterios utilizados por De Bièvre et al [12] a la zona de estudio. Se consideraron cinco categorías:

1. **Sin estrés hídrico:** durante todo el año tanto el caudal medio como el caudal Q80% son mayores a la demanda de agua media anual.
2. **Estrés hídrico ligero:** durante 1 a 4 meses la demanda es mayor al Q80%, y durante todo el año la demanda es menor que el caudal medio.
3. **Estrés hídrico moderado:** durante 0 a 4 meses la demanda es mayor al caudal medio y durante 5 a 8 meses la demanda es mayor al Q80%.
4. **Estrés hídrico alto:** durante 5 a 8 meses la demanda es mayor al caudal medio y durante 9 a 11 meses la demanda es mayor al Q80%.
5. **Estrés hídrico severo:** durante todo el año la demanda es superior al caudal Q80% y durante más de 8 meses la demanda se superior al caudal medio.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Ocupación del suelo

La mayor ocupación del suelo en el área de estudio es el páramo herbáceo (30,19%), que se distribuye por las cotas elevadas del tramo medio y alto de la cuenca, principalmente en la cabecera y en las laderas de mayor pendiente. Siguen en importancia las superficies dedicadas al pasto (20,45%), con una distribución algo dispersa pero con presencia en el tramo alto, medio y bajo de la cuenca; así como el páramo arbustivo (13,39%), y las plantaciones forestales (9,22%), con una presencia mucho menor (Tabla 3; Figura 3 y 4).

Desde una perspectiva evolutiva los mayores cambios se encuentran comparando las cubiertas del inicio del periodo estudiado (1975) con las del final (2013), y reservando el periodo central (2002) para control de datos. La variación más espectacular se produce con los cultivos de invernadero que, con una tasa de cambio de 23,84 ha/año, pasan de significar un escaso 0,70% en 1975 para contribuir en un 7% del conjunto en 2013. Siguen en importancia las superficies dedicadas a pastos, que se incrementan en un 336,03%, principalmente a costa de campos de cultivo al aire libre (-98,44%).

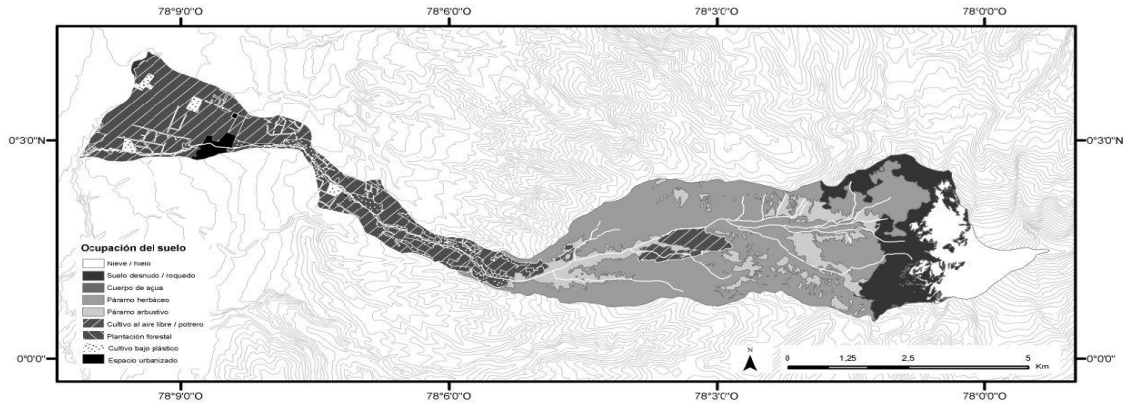


Figura 3. Ocupación del suelo (1975)

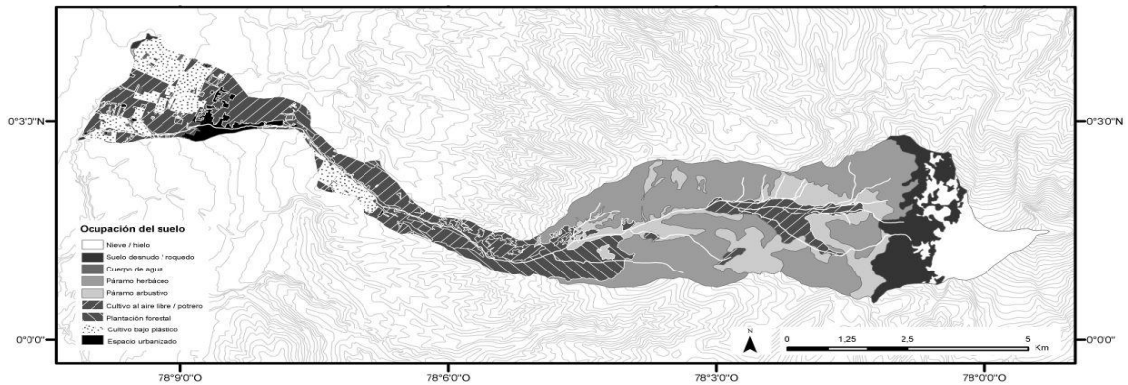


Figura 4. Ocupación del suelo (2013)

Las plantaciones forestales pasan de una participación del 4,7% en 1975 a una del 9,22% a final del periodo, revelando una tasa de cambio de un incremento de 2,54 ha/año. Las superficies edificadas experimentan una variación del 80%, mientras que otras clases naturales, como el páramo herbáceo, descienden en torno al 23%. Finalmente destaca el leve decremento de la superficie ocupada por glaciares (7,87%), que únicamente en una parte muy pequeña se corresponde en un aumento de las superficies de roca y suelo desnudo (tasa de cambio de -0,290 ha/año).

Los usos del suelo con mayor incremento de superficie, por este orden, son los cultivos bajo invernadero, los potreros, las plantaciones forestales y las superficies edificadas, si bien la diferencia entre cambio de uso es más importante en los cultivos al aire libre, bajo invernadero, las áreas de pasto y las plantaciones forestales (Tabla 3).

La correspondencia entre categorías más significativa se produce en aquellas superficies que, en 1975 se dedicaban a cultivos al aire libre y que en 2013 migran a potrero y a cultivos bajo plástico, seguido de las superficies inicialmente ocupadas por páramo y, más tarde, por potreros y plantaciones forestales.

Los caudales medios para 2002 y 2013 presentan ligeras variaciones entre sí; con distintas tendencias para el verano y el invierno (Figura 5). Para el invierno la oferta natural en 2013 es superior, mientras que para el verano lo es la oferta del 2002. Dependiendo la Hidrozona que se analice se tiene diferentes resultados para los dos años analizados, principalmente relacionado con la variación de áreas para las distintas ocupaciones.

El páramo presenta resultados muy similares, con mínimas variaciones para los dos años. Las hidrozonas: tierra erosionada, urbano, invernadero y plantación forestal; generan mayores caudales en 2013. Finalmente las hidrozonas: agrícola, pasto y glaciar; generan mayores caudales en 2002. Las mayores variaciones entre los dos años mencionados se encuentran para las hidrozonas plantación forestal, pasto y tierra erosionada en las épocas de invierno principalmente. El incremento de área ocupada por plantación forestal e invernadero y su consiguiente aumento de aporte hídrico, es la causa principal para que el caudal de 2013 sea ligeramente superior al de 2002 especialmente para el invierno. Como se puede apreciar en la Figura 5; se observa que los caudales para 2013 son superiores en invierno, pero inferiores en verano al compararlos con los del 2002.

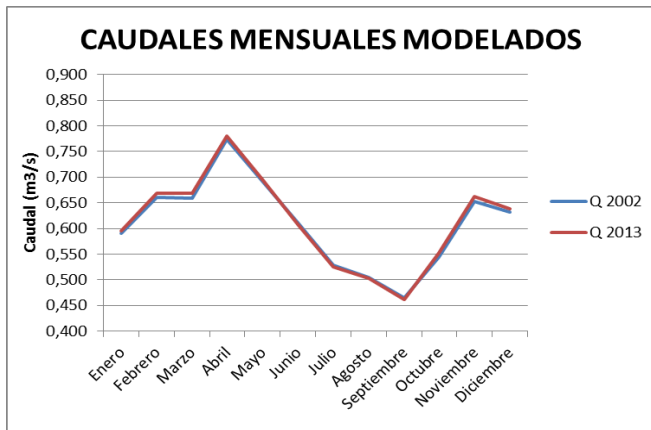


Figura 5. Variación de los caudales medios obtenidos para los años 2002 y 2013, considerando la precipitación mensual media multianual.

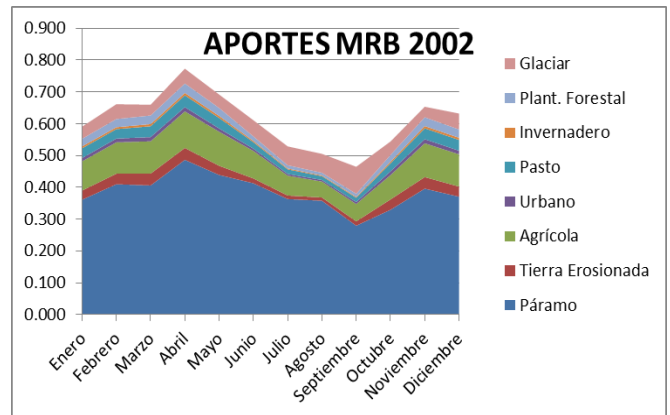


Figura 7. Aportes de caudal de las distintas hidrozonas, con la ocupación del suelo de 2002.

Respecto al aporte de caudal para las distintas hidrozonas (Figuras 6 y 7) para 2002 la parte glaciar en verano, así como la agrícola en invierno aportan un mayor caudal que en 2013. Para los dos años el páramo sigue siendo la fuente principal de aporte.

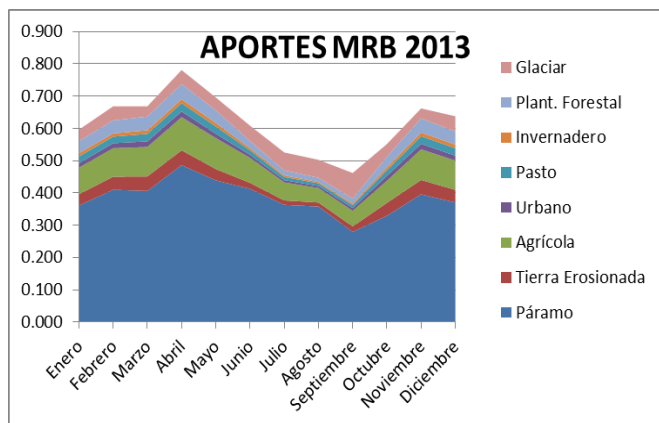


Figura 6. Aportes de caudal de las distintas hidrozonas, con la ocupación del suelo de 2013.

La mayor parte del cauce principal del río Blanco presenta un índice de estrés hídrico moderado. Las zonas con mayor déficit hídrico, es decir con un estrés hídrico severo, se encuentran en los tributarios con las mayores captaciones.

La Figura 8 muestra este aspecto y señala, también, como aguas abajo los aportes naturales aumentan y el estrés hídrico disminuye.

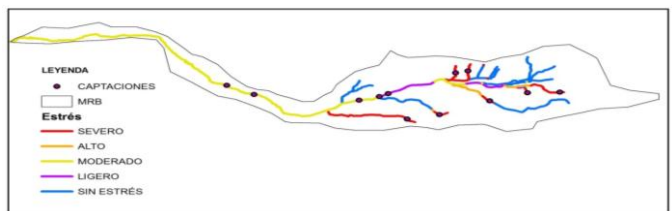


Figura 8. Índices de estrés hídrico para 2013, en los diferentes tramos del río.

### 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El ejercicio realizado compara la ocupación del suelo y la oferta natural de agua en una misma área de estudio para dos años: 2002 y 2013. Los resultados muestran una variación notable en la ocupación del suelo, principalmente en las clases de invernadero, potrero, plantación forestal y superficie edificada, que no solo se patenta en el periodo 2002-2013 sino también, y de forma muy particular, en el 1975-2013. Comparando la oferta natural de agua entre los dos años se observa que la variación de la misma es pequeña (< 2%) y presenta dos comportamientos. Para el invierno el caudal de 2013, es superior al de 2002. Por otro lado para el verano se tiene el fenómeno inverso. El tener mayores caudales en verano para 2002 está íntimamente relacionado con la mayor oferta natural del glaciar principalmente. Lo que evidencia la importancia de los deshielos durante el verano y alerta sobre las consecuencias de reducción de caudal que podría darse en verano, si el área glaciar sufriera reducciones mayores.

Respecto a los índices de estrés hídrico obtenidos, se observa que en las zonas altas de la cuenca principalmente, se tiene tributarios sin estrés. La mayor parte del cauce principal presenta un estrés hídrico moderado. El principal problema para obtener los índices de estrés hídrico son las captaciones; la validez de los datos y la dificultad para modelarlos.

La ocupación que ha experimentado mayor variación hidrográfica ha sido el espacio edificado, epígrafe bajo el cual también cabe incluir las superficies ocupadas por invernaderos. Las plantaciones forestales, el suelo desnudo y

el páramo también experimentan variaciones importantes, con respuestas hídricas igualmente bien distanciadas. En el modelo empleado, los coeficientes de escorrentía tienen una importancia marcada, debido a que estos valores definen la producción de oferta natural de agua. Estos coeficientes fueron obtenidos únicamente en función de la ocupación del suelo. Para aumentar la precisión del modelo se debería tomar en cuenta no solamente la ocupación del suelo sino también la pendiente y textura del terreno, información que al no estar disponible en una escala adecuada no pudo ser empleada.

El estudio realizado, finalmente, aporta información básica sobre el área del nevado Cayambe. Trabajos como el presente ayudan a generar y recopilar información de carácter ambiental sobre un área de elevado interés territorial, y sientan las bases para investigaciones mucho más detalladas y de mayor alcance.

### AGRADECIMIENTO

Agradecimientos: Esta publicación ha podido realizarse en parte gracias al programa Prometeo de la SENESCYT, para la participación del Dr. David Serrano, una iniciativa del gobierno del Ecuador que pretende fortalecer las instituciones de educación superior e investigación de este país; así como también de la contribución económica parcial del Programa LMI (Laboratorio Mixto Internacional) Great Ice (Glaciares y recursos hídricos en los Andes Tropicales: Indicadores Climáticos y Ambientales) del IRD de Francia. Al programa CYTED sobre el análisis de degradación de ecosistemas en Iberoamérica.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PNUMA. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. Mundi-Prensa, Madrid. 2007.
- [2] Bates, B.; Kindzewicz, Z.; We, S.; Paulitkof, J. “*El cambio climático y el agua*”. IPCC, Ginebra, 2008.
- [3] FAO, “El cambio climático, el agua y la seguridad alimentaria”. FAO, 2, Roma, 2013. Recuperado de: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0142s/i0142s07.pdf>. Última visita: 1 de agosto de 2013.
- [4] Holmes Jim. OMS, “Datos y Cifras: Escasez de Agua”, 2009 Recuperado de: [http://www.who.int/features/factfiles/water/water\\_facts/es/index.html](http://www.who.int/features/factfiles/water/water_facts/es/index.html) Última visita: 4 de noviembre de 2014.
- [5] Tucci, C.E.M., *Plan de Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Cuenca Alta del Río Guayllabamba*, BID Banco Interamericano de Desarrollo Económico y FONAG Fondo para la Protección del Agua. , 2009, 147p Recuperado de: <http://www.flla.net/que-hacemos/iniciativas-estrategicas/gobernanza-del-agua.html> Última visita: 4 de noviembre de 2014.
- [6] Hofstede, R. “The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands”. *Plant and Soil*, 173, 1995, pp 111-132.
- [7] De Bièvre, B.; Íñiguez, V.; Buytaert, W. “Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad”. *Páramo*, 21, 2006, pp 26-44, Secretaría General de la Comunidad Andina, Quito. [En línea] Recuperado de: [http://www.infoagua-guayllabamba.ec/sirhcg/images/M\\_images/PDF/Estudio%20de%20disponibilidad%20de%20agua.pdf](http://www.infoagua-guayllabamba.ec/sirhcg/images/M_images/PDF/Estudio%20de%20disponibilidad%20de%20agua.pdf) Última visita: 4 de noviembre de 2014.
- [8] Samaniego, P.; Monzier, M.; Robin, C.; Hall, ML. “Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe Volcano, Ecuador”. *Bulletin of Volcanology*, 59: pp 451-459. 1998.
- [9] INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuatoriano) (2013). *Censo de población 2010*. [En línea] Recuperado de: <http://www.inec.gob.ec/estadisticas/> Última visita: 4 de noviembre de 2014.
- [10] Ruiz-Torres, AJ.; Villalobos, JR.; Salvador-Jijon, M.; Alomoto, N. “Planning models for floriculture operations”, 2012, *International Journal of Applied Management Science*, 4(2): pp148-164.
- [11] Montero, A. *En el vértice del Ecuador*. México DF: MMX: 2010 [En línea] Recuperado de: <http://www.montero.org.mx/libros/vertice/LIBRO.html> Última visita: 26 de agosto de 2013.
- [12] Maidment, D. *Handbook of hydrology*, MacGraw-Hill, New York. 1992
- [13] De Bièvre, B.; Coello, X.; De Keizer, O.; Maljaars, P. (2008). *Modelo hidrológico de la Hoya de Quito. Proyecto de manejo integrado de los recursos hídricos en la hoya de Quito*. UICN-Sur, Quito. [En línea] Recuperado de: [http://www.infoagua-guayllabamba.ec/sirhcg/images/M\\_images/PDF/4%20Modelo%20hidrológico.pdf](http://www.infoagua-guayllabamba.ec/sirhcg/images/M_images/PDF/4%20Modelo%20hidrológico.pdf). Última visita 20 de Octubre de 2013.
- [14] Martínez, M, *Estimación de variables hidrológicas*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, 2005, [En línea], Recuperado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/7/05estim-scurrim.pdf> Última visita 12 de marzo de 2014.
- [15] Rázuri, L., *Estructura de conservación de suelos y aguas, Serie Riego y Drenaje 32*, Pgs: 7-33. Centro Interamericano de Desarrollo de Agua y Tierras, Mérida Venezuela. 1984.
- [16] Minas de Buenaventura, *Modificación al estudio de Impacto ambiental Esperanza*, Dirección regional de Energía y Minas, Región Huancavelica, Perú, 2001, [En línea] Recuperado de: <http://www.regionhuancavelica.gob.pe/region/descargas/Direccion%20Energia%20y%20Minas/2013/estudio/levan-observ-modi-pro-ade-manejo-ambie-unidad-esperanza2001-LMP-ECA-buenaventura.pdf> Última visita 16 de febrero de 2014.
- [17] Benítez, C., Arias W., y Quiroz J., *Manual de conservación de suelos y aguas*, Ministerio de Agricultura y Alimentación. Lima, Perú. 1980, Pgs. 168-169
- [18] Aparicio, F., *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Limusa, México, 1999.
- [19] Valencia, G. “Análisis de la Disponibilidad de los Recursos Hídricos en la Microcuenca del Río Blanco (Nevado Cayambe), Utilizando El Modelo Oferta-Demanda En Arcgis” Tesis De Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2014.

Apéndice A. TABLAS

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas e hidrológicas empleadas en el estudio

Código	Nombre	Localización Geográfica			Tipo
		Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)	
M023	Olmedo-Pichincha	0° 08' 53" N	78° 02' 52" W	3120	CO
M359	Cayambe	0° 03' 14" N	78° 08' 22" W	2840	PV
M490	Sardinas	0° 22' 16" S	77° 48' 06" W	1615	PV
M188	Papallacta	0° 21' 54" S	78° 08' 41" W	3150	CO
M009	La Victoria Guayllabamba	0° 03' 26" S	78° 12' 02" W	2262	CO
M321	Topo – Imbabura	0° 12' 41" N	78° 09' 58" W	2860	PV
M344	Cangahua Pichincha	0° 03' 26" S	78° 10' 02" W	3140	PV
M203	Reventador	0° 25' 13" S	77° 58' 00" W	1145	PV
MA2T	Tomalón Tabacundo	0° 02' 00" N	78° 14' 00" W	2790	AG
H152	La Chimba en Olmedo	0° 08' 42" N	78° 28' 12" W	3096	LM
H143	Granobles AJ Guachalá	0° 15' 36" N	78° 09' 58" W	2750	LG
H144	Guachalá AJ Granobles	0° 07' 48" N	78° 09' 19" W	2740	LG

Tabla 2. Valores de coeficientes de escorrentía para distintos usos de suelo, obtenidos de la bibliografía.

Hidrozona	Coefficiente de escorrentía
Bosque	0.2 – 0.4 para texturas de suelo medias y gruesas y pendiente menor al 40% [14].
Páramo	0.51 – 0.83 [15] [16]
Tierra Erosionada	0.5 – 0.7 para suelos con pendientes entre 20 y 50% y permeabilidad media y alta [17].
Agrícola	0.30 – 0.72 para texturas de suelo medias y gruesas y pendiente menor al 40% [14]. 0.65 – 0.25 para suelos con pendientes entre 20 y 50% y permeabilidad media y alta [15].
Urbano	0.70 – 0.95 [18].
Pasto	0.10 – 0.40 para texturas de suelo medias y gruesas y pendiente menor al 40% [14].
Invernadero	No existen datos para invernadero, pero se consideró en rango entre 0.6 y 0.7, al ser similar a urbano y a tierra erosionada por tener una cobertura impermeable [19].
Plantación forestal	0.10 – 0.50 para texturas de suelo medias y gruesas y pendiente menor al 40% [14].

Tabla 3. Comparación de cubiertas del suelo y tasa de cambio (1975-2013)

Ocupación	Ocupación en 1975 (%)	Ocupación en 2013 (%)	Cambios en ocupación del suelo 1975-2013 (%)	Tasa de cambio 1975-2013 (Ha/año)
Nieve/hielo	8,13	7,87	-3,20	-0,089
Suelo desnudo/roca	10,68	1,80	-83,15	-0,290
Cuerpo de agua	0,00	0,26	---	---
Páramo herbáceo	39,14	30,19	-22,87	-0,603
Páramo arbustivo	10,86	13,39	+23,30	+0,609
Potrero	4,69	20,45	+336,03	+12,120
Plantación forestal	4,69	9,22	+96,59	+2,536
Cultivo al aire libre	21,15	0,33	-98,44	-2,590
Cultivo en invernaderos	0,69	6,99	+913,04	+23,837
Superficie edificada	1,00	1,80	+80,00	+2,077



Tabla 4. Caudales medios modelados para la MRB, en los años 2002 y 2013.

<b>AÑO</b>	<b>2002</b>	<b>2013</b>
<b>Mes</b>	<b>Qmed (l/s)</b>	<b>Qmed (l/s)</b>
Enero	590,40	596,01
Febrero	661,19	668,37
Marzo	659,54	668,52
Abril	772,92	780,84
Mayo	691,68	695,73
Junio	610,86	608,56
Julio	528,57	525,48
Agosto	505,18	502,66
Septiembre	464,50	461,84
Octubre	544,01	551,69
Noviembre	653,23	661,92
Diciembre	631,88	637,55
Suma	7313,96	7359,18