



Universidad de Concepción

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería Agrícola-Programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola con
mención en Recursos Hídricos en la Agricultura

**Evaluación de la Vulnerabilidad Hídrica de una Cuenca del
Río El Ángel y Demanda de Agua de la Población en
Escenarios de Cambio de Uso de Suelo**

Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Agrícola con
mención en Recursos Hídricos en la Agricultura

JORGE ANDRES ESPINOSA MARIN

CHILLAN-CHILE

2016

Profesor Guía: .Dr. Diego Rivera Salazar
Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Evaluación de la Vulnerabilidad Hídrica de una Cuenca del Río El Ángel y Demanda de Agua de la Población en Escenarios de Cambio de Uso de Suelo

Aprobada por la comisión:

**Diego Rivera Salazar
Ingeniero Civil, Ph. D.**

Profesor Guía

**José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Doctor**

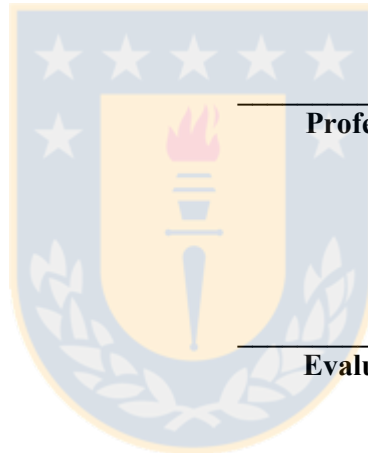
Profesor Co-Guía

**Hamil Uribe Cifuentes
Ingeniero Civil, Doctor**

Evaluador Externo

**Mario Lillo Saavedra
Ingeniero Civil, Doctor**

Director de Programa



AGRADECIMIENTO

El autor deja constancia expresa de sus sinceros agradecimientos a todos y cada una de las personas, quienes de alguna forma colaboraron en la implementación, desarrollo y conclusión de esta tesis.

A mi Director:

Dr. Diego Rivera Salazar por su apoyo incondicional en todas las etapas de esta tesis.

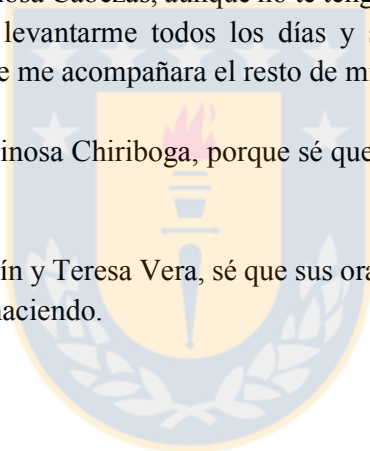
A Dios y mi familia Celia, Christian, Silvia, Elías, Martina, por siempre ser la fuerza y el apoyo en los más duros momentos, gracias por sus palabras de ánimo.

A mi Esposa por ser mi alegría, gracias por entender mis locuras, mis sueños, mis anhelos gracias por llegar cuando se apagó la luz!

A mi hija, Erín Danahe Espinosa Cabezas, aunque no te tengo a mi lado eres la luz, fuerza y energía que me ayuda a levantarme todos los días y ser mejor, ahora sé que tus bendiciones serán esa luz que me acompañara el resto de mi vida.

A mi Padre Elías Arturo Espinosa Chiriboga, porque sé que desde el cielo me cuidas me ayudas y me bendices.

A mis Abuelos Eduardo Marín y Teresa Vera, sé que sus oraciones siempre me ayudaron y ahora en lo alto lo siguen haciendo.



*Lánzate a conquistar las cimas en
ellas está dispuesta para ti la
“libertad”*
(Anónimo)



INDICE GENERAL

1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PÁRAMO	2
1.1.1. Clima del Páramo	5
1.1.2. Flora y fauna del páramo	7
1.1.3. Servicios ecosistémicos del páramo y su historia.....	8
1.1.4. Hidrología del Páramo	12
1.1.5. Actividades Antrópicas y el cambio de la hidrología del páramo	16
1.2. SELECCIÓN DEL MODELO.	16
1.2.1. Selección del periodo de estudio y las opciones básicas de modelación.....	17
1.2.2. Configuración del modelo SWAT	17
1.2.3. Preparación de los datos espaciales básicos	17
1.2.4. Especificación del valor de Curva Número.....	19
1.2.4.1. Infiltración.....	19
1.2.5. Preparación de la base de datos meteorológica e hidrológica	22
1.3. VULNERABILIDAD	22
1.3.1. Índice de Aridez	23
1.3.2. Índice de escasas a nivel de unidad hidrológica de respuesta	24
1.4. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25
1.5. HIPÓTESIS.....	28
1.6. OBJETIVOS	28
1.6.1. OBJETIVO GENERAL	28
1.6.2. OBJETIVO ESPECIFICOS	28
2. CAPITULO 2: SOIL PERMEABILITY STUDY APPLIED TO THE GENERATION OF MAPPING IN TWO CANTONS OF LOJA PROVINCE, ECUADOR.....	37
2.1. SUMMARY	37
2.2. INTRODUCTION.....	38
2.3. MATERIALS & METHODS.....	41
2.3.1. Thematic mapping.....	41
2.3.2. Selection and definition of variables	41
2.3.3. Study Area.....	43
2.3.4. Collection of information and field work.....	44
2.3.5. Analysis of patterns	47
2.4. RESULTS AND DISCUSSION	47

2.5.	CONCLUSIONS.....	50
2.6.	ACKNOWLEDGEMENTS	51
2.7.	REFERENCES.....	52
3.	CAPITULO 3: VULNERABILITY OF WATER RESOURCES AT THE ECUADORIAN PÁRAMO TO LAND USE CHANGES	61
3.1.	ABSTRACT.....	61
3.2.	INTRODUCTION.....	61
3.3.	MATERIALS AND METHODS	63
3.3.1.	Area of study	63
3.3.2.	Climate	65
3.3.3.	Soils and current land use.....	67
3.3.4.	SWAT hydrological model	69
3.3.5.	Hydrologic areas of interest	70
3.3.6.	Current land use map and generation of modeling scenarios.....	71
3.3.7.	Calibration and validation of the hydrological modeling.....	72
3.3.8.	Changes in water availability regarding changes in land use	72
3.4.	RESULTS AND DISCUSSION	76
3.4.1.	Results of calibration and validation of the hydrological model.....	76
3.4.2.	Effect of changes on water availability	77
3.5.	DISCUSSION	80
3.6.	CONCLUSIONS.....	82
3.7.	ACKNOWLEDGEMENTS	83
3.8.	REFERENCES.....	83
4.	CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	93
4.1.	DISCUSIÓN GENERAL.....	93
4.1.1.	Estudio de Permeabilidad de suelos aplicada a la generación de cartografía temática de permeabilidad en dos cantones de la Provincia de Loja, Ecuador	93
4.1.2.	Estudio de la vulnerabilidad hídrica del páramo ecuatoriano frente al cambio de uso y actividades antrópicas en la cuenca del Río el Ángel.....	94
4.1.3.	Implicaciones en políticas públicas respecto a evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de la microcuenca del río Ángel.....	96
4.2.	CONCLUSIONES	98
4.3.	FUTURAS INVESTIGACIONES	100
4.4.	REFERENCIAS.....	101

Índice de Tablas

Tabla 1. 1. Familias más diversas en géneros y especies de varios grupos de plantas en los páramos (fuente: Luteyn, 1999)	7
Tabla 1. 2. Categorización del índice de aridez (ENA, 2000).....	24
Tabla 2. 1. Permeability rating methodology (Cisneros, 2001).....	49
Tabla 3. 1. Climatic variables with analyzed periods, Precipitation, Temperature (period: 1975-2015), Evaporation, Heliophany, Relative Humidity, Cloudness and Wind (period: 1989 - 2012). Data from Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología	66
Tabla 3. 2. Difference in area between 2000 and 2014 according to the change of land use in the study area.	72
Tabla 3. 3. Categorization aridity index adapted to the basin of the river El Angel (ENA, 2000).	73
Tabla 3. 4. Categories of scarcity indexes at hydrological response unit (IDEAM, 2010)	75
Tabla 3. 5. Statistical indicators (monthly medium flows) for the calibration and validation phases of the sub-basin 2 of the river El Angel.....	77
Tabla 3. 6. A) Aridity index for sub-basin 1, B) Aridity index for sub-basin 2	78
Tabla 3. 7. Scarcity indexes of the basin of the river El Ángel	82

Índice de Figuras

Figura 1. 1. Distribución actual de los páramos en América.....	3
Figura 1. 2. Contenido de agua actual de los suelos de la microcuenca de Huagrauma sobre el tiempo, comparado con la precipitación (barras), (Buytaert , 2004).....	16
Figura 1. 3. (A) Ubicación política administrativa del área de estudio (B) Mapa base con las estaciones meteorológicas e hidrológicas que se evaluarán en el presente estudio.....	26
Figura 2. 1. A) Categorization of geology in the study area. B) Categorization of morphology in the study area C) Categorization slope.....	42
Figura 2. 2. A) Administrative policy location of the study area in the Ecuadorian territory with geographical location of the sampling points with methodology. B) Rainfall map C) Temperature map	43
Figura 2. 3. A) Infiltrometer Diagram.	45
Figura 2. 4. Permeability map of the study area.....	49
Figura 2. 5. A) Map Soil taxonomy B) Map Organic matter	50
Figura 3. 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Rio El Ángel (Sigagro,2002) 64	
Figura 3. 2. A) Map of Temperature B) Map of Precipitation (Siagro, 2002)	66
Figura 3. 3. Average monthly time series of temperature and precipitation period 1976 -2012 67	
Figura 3. 4. A) Map of Soil Taxonomy B) Map of land use of the year 2000 C) Map of land use of the year 2014.....	68
Figura 3. 5. Delimitation of sub-basins for hydrological modeling	70
Figura 3. 6. Calibration and validation (monthly results) for Sub-basin 2 of El Angel river (A). Scatter plots for simulated flow in relation with observed flow regarding sub-basin 2 of El Angel river (B) Calibration (C) Validation	76
Figura 3. 7. Spatial distribution of average annual rate of vulnerability of the delimited sub-basins of the basin of the river El Angel.	79
Figura 3. 8. Vulnerability map established for different scenarios of land use in the micro-basin of the river El Angel A) Vulnerability of the year 2000 B) Vulnerability of the year 2015.	81
Figura 3. 9 .Variation of scarcity indexes of the basin of the river El Ángel.....	81

Resumen

La disponibilidad y libre acceso al recurso hídrico para el normal desarrollo de las diferentes antrópicas mediante el uso sostenible y sustentable de la misma, es el reto que se ha planteado la humanidad, más aun considerando que durante los últimos años la población mundial se ha duplicado, lo cual ha mostrado un alto nivel de vulnerabilidad de la población ante los cambios del clima y cambio del uso de suelo debido a que este tipo de alteraciones tienen influencia directa sobre la disponibilidad de agua, por ende en la producción de alimentos y la actividad productiva en general.

El área en estudio es la cuenca del Río Ángel que representa una de las zonas agrícolas más productivas de la Provincia del Carchi en Ecuador, la productividad se encuentra fuertemente limitada por una inadecuada gestión de agua con fines de riego lo que afecta en la cantidad, calidad, distribución, acceso y gestión de los recursos hídricos.

Esta área se encuentra sobre los 3000 metros por lo cual se la considera como un zona de altura lo cual hace difícil el acceso al recurso hídrico, por lo cual las actividades agrícolas dependen directamente del agua proveniente de las lluvias que se presentan en las épocas de precipitación, la presencia de paramo en la parte alta sobre los 3600 metros regula la disponibilidad de agua a lo largo del año por ende la sostenibilidad productiva se encuentra relacionada directamente con la cantidad de agua que puede producir la cuenca.

Por lo anterior se generaron herramientas capaces de analizar el comportamiento de la cuenca bajo diferentes escenarios de cambio de uso de suelo que cuenten con un adecuado soporte científico, para así poder identificar áreas vulnerables en las cuales se evaluará la disponibilidad del recurso hídrico que puede existir bajo supuestos de cambio de la cobertura vegetal, el propósito de esta investigación es sentar las bases sobre las cuales emprender el desarrollo agrícola y pecuario del área de estudio, lo que permitirá el

adecuado uso de los recursos hídricos disponibles y la generación de acciones dirigidas al incremento de la productividad agrícola y ganadera.

Para llevar a cabo lo anterior se utilizará un modelo físicamente basado y semidistribuido, el cual será configurado y calibrado para la zona de estudio basándose en las investigaciones ya existentes, como resultado se espera conseguir un balance hídrico que sea preciso, que reproduzca de manera adecuada los procesos hidrológicos predominantes, capaz de modificar la respuesta hidrológica según las forzantes climáticas y de superficie de uso de suelo en diferentes escenarios.

Los resultados obtenidos respecto a los impactos hidrológicos producidos en el escenario formulado de acuerdo al constante aumento en la superficie de cultivo entre los años 2000 y 2014, en la cuenca del Rio el Ángel con la aplicación del modelo semidistribuido SWAT calibrado y validado para las diferentes subcuencas, indican que existe vulnerabilidad ante la presión de incremento del área de cultivo y se puede evidenciar en términos de reducción de los caudales para satisfacer las demandas del recurso hídrico que puede estar asociada al incremento de la evapotranspiración, pérdida de capacidad de retención de agua por parte del suelo lo cual incide en la producción de los diferentes cultivos que se desarrolla en esta cuenca.

Palabras Claves: Vulnerabilidad, Modelación Hidrológica, Permeabilidad, Páramo

Abstract

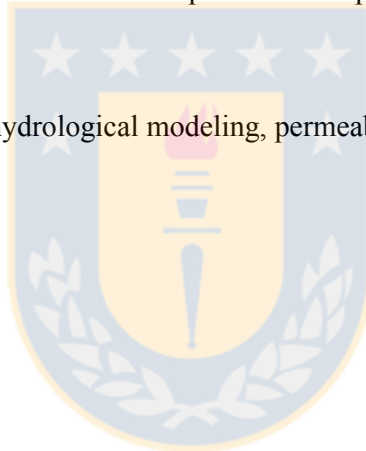
The availability and free access to water resources for the normal development of different anthropogenic activities through sustainable and sustainable, is the challenge that has been raised humanity, even more considering that in recent years the world population has doubled, has shown a high level of vulnerability of the population to the changes in climate and land use changes because such changes have a direct influence on the availability of water, therefore in food production and activity production in general. The study area is the Angel River basin is one of the most productive in the province of Carchi in Ecuador agricultural areas, productivity is severely limited by inadequate water management for irrigation which affects the amount, quality, distribution, access and management of water resources, this area is about 3000 meters so it is regarded as an area of height which makes it more difficult access to water resources on which agricultural activities depend water directly from the rains during times of precipitation, the presence of paramo in the upper 3600 meters on regulating water availability throughout the year therefore productive on Sustainability is directly related to the water amount can produce. It is for this that through the proposed methodology aims to create tools capable of analyzing the behavior of the basin under different scenarios of change in land use that have an adequate scientific support, in order to identify vulnerable areas in which it will assess the availability of water resources that may exist in cases of change of vegetation cover, the purpose of this investigation is to establish the basis on which to undertake agricultural and livestock development in the study area, allowing the proper use of available water resources and generating actions aimed at increasing agricultural and livestock productivity.

To accomplish the above, used a physically based model and semi-distributed, which will be configured and calibrated for the study area based on existing research, as a result is

expected to achieve a water balance that is necessary to reproduce properly used prevailing, able to modify the hydrological response depending on weather and surface forcing land use in different scenarios hydrological processes.

The results regarding the hydrologic impacts on stage formulated according to the steady increase in acreage between 2000 and 2014, in the basin of Rio Angel with the application of SWAT semi-distributed model calibrated and validated for different sub-basins indicate that there is vulnerability to pressure from increased cultivation area and can show in terms of reduced flows to meet the demands of water resources that may be associated with increased evapotranspiration, loss of capacity for water retention by soil which affects the production of different crops that develops in this basin.

Keywords: Vulnerability, hydrological modeling, permeability, Paramo



1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

El agua es un compuesto abundante en la superficie terrestre de la cual aproximadamente solo un 1% de agua es aprovechable y se encuentra repartida en embalses, ríos, quebradas, acuíferos, manantiales. Por esta razón considerando que el agua es un recurso limitado para las diferentes actividades antrópicas y su disponibilidad es condicionada por diferentes elementos que no pueden ser controlados como la variabilidad climática o por diferentes trabajos de ingeniería principalmente en ciudades de altura para su distribución, es necesario desarrollar herramientas de gestión sobre este recurso para las diferentes cuencas hídricas a nivel mundial.

El planeamiento sobre la importancia de los hábitats o ecosistemas de montaña a nivel mundial en los cuales generalmente se presentan graves problemas en la disponibilidad de agua para los asentamientos humanos, es ampliamente estudiado por diferentes proyectos asociados a las Naciones Unidas, así como diferentes ONG'S que realizan aportes fundamentales para una adecuada gestión de los recursos hídricos en estas áreas, en Sudamérica los esfuerzos se centran en los páramos andinos que son ecosistemas fundamentales para la regulación de la hidrología al nivel regional y constituyen la única fuente de agua para la mayoría de las poblaciones localizadas en los Andes, al hablar de la importancia de los páramos tenemos que referirnos a la regulación de los caudales, los cuales se ven afectados principalmente por el cambio de uso de suelo asociada con la presión agrícola.

Los páramos se caracterizan por tener climas muy húmedos de baja estacionalidad térmica y marcadas variaciones diurnas de temperatura, la importancia social del ecosistema páramo radica en la gran suma de personas que utilizan sus servicios ecosistémicos para cubrir necesidades básicas. Los beneficios son amplios y se los relaciona con la productividad que proporciona el suelo lo que hace que este ecosistema constituya un sitio con alto potencial para varias actividades y generación de recursos económicos no tradicionales para las comunidades que lo habitan. (Beltrán et al. 2009; Beltrán, K., 2010), cabe resaltar que el principal servicio que presta este tipo de ecosistema es el hidrológico ya que aportan a la recarga de aguas subterráneas y acuíferos, como se mencionó anteriormente son los principales reguladores de caudales pero la valoración de los mismo varía según los distintos

tipos de humedales, además se debe mencionar su efecto en el ciclo hidrológico, y por lo tanto su relevancia en la disposición de agua para personas y los múltiples usos que hacen con ella, incluyendo el riego y energía, esto es debido a que el páramo es un ecosistema con una vocación particular para almacenar agua debido a la alta carga orgánica y estructura porosa, es conocido que el recurso hídrico en un área determinada constituye el elemento básico en todo ecosistema para su normal desarrollo, es por esto que el entender su hidrología permitirá un adecuado desenvolvimiento de las actividades antrópicas.

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PÁRAMO

El concepto de páramo es complejo, se lo puede considerar como un ecosistema, bioma, paisaje, área geográfica, zona de vida, zona de producción e inclusive un estado de clima, dependiendo del actor que está influenciando por esta área geográfica. (Hofstede et al 2003). El concepto incorpora múltiples elementos, factores, límites, zonificaciones, herencias, perturbaciones, migraciones, biomas, fisionomías, estructuras, funcionamiento, evolución y configuraciones por lo cual se han generado varias definiciones del mismo sin lograr un consenso adecuado, de la misma manera suele ser definido desde criterios ecológicos ya que depende del territorio u servicio ecosistémico que brinda, dentro de las principales definiciones podemos resaltar las siguientes:

- Los páramos empiezan donde termina el dominio de las selvas y termina donde comienza la nieve perpetua. Se trata de una auténtica formación de cordillera alta. Originalmente la palabra ‘páramo’ en latín significa precisamente lo contrario, o sea ‘llanos’ (Mayer-Lubke, 1911), paramus fue adoptado por el latín como celticismo, ya que en España se denominaba ‘paramera’, hasta la época de la conquista, a la meseta desierta de la árida Castilla, en contraposición a las regiones fértiles más bajas. Y quizás este mismo contraste entre las verdes selvas de los valles y las altas regiones heladas, y sin árboles, pueden haber llevado a los conquistadores a usar la palabra páramos en América del Sur". (Volkmar Vareschi. 1970.)
- Los páramos consisten en las regiones más elevadas de la cordillera de los Andes desde Venezuela al Ecuador por Colombia, donde predominan condiciones especiales de altas montañas; son regiones sometidas a bruscos cambios; son frías y húmedas, generalmente cubiertas de niebla o sujetas a constantes precipitaciones y a fuertes

vientos; pero estos fenómenos alternan con días claros de intensa radiación; las noches son siempre muy frías y en las partes más elevadas (más arriba de 4.300 metros) con nevadas nocturnas muy frecuentes. El suelo está generalmente saturado de agua; en extensas zonas es pantanoso, formándose turberas; la tierra es negra turbosa, con elevado grado de acidez; este suelo es muy profundo excepto en las zonas más altas, donde la vegetación es ya escasa entre rocas y arenales; los límites altitudinales del páramo no son muy precisos, pues varían según la topografía pero empiezan a 3.200 metros, extendiéndose hasta una línea de 4.500-4.700 metros que es el nivel de los neveros permanentes. (Cuatrecasas, 1989)

En Sudamérica los páramos forman un corredor o collar de perlas (Balslev, 2001) entre la cordillera de Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba en el norte de Perú, dos complejos más separados los páramos de Costa Rica y la Sierra Nevada Santa Martha, con una continuidad en el sur en Jaica Perú (Dinerstein et al, 1955).



Figura 1. 1. Distribución actual de los páramos en América

Si tomamos el páramo como un ecosistema tropical húmedo sobre el límite del bosque podemos incluir todos los pajonales naturales de altura a nivel internacional y se encuentran entre 8 grados latitud Norte y 11 grados latitud sur (Walter 1973., Lauer 1981, Lutey 1999)

Los páramos a nivel mundial aplicando a todos los ecosistemas tropicales, incluyen una serie de ecosistemas con diferentes nombres entre los que se encuentran diferentes tipos de pajonales de altura conocidos como tropical alpino (Rundel et al 1994), sobre las montañas

en el oriente de África, desde Etiopía y Uganda hasta Kenia, Tanzania y Sudáfrica, que es un ecosistema con características similares a los páramos neotropicales con altitudes cercanas a los 4000 metros de altura

El páramo es considerado como uno de los varios ecosistemas que existen en Ecuador, siendo su área de desarrollo desde los 3000 metros de altura entre el bosque cerrado y la nieve perpetua en los trópicos húmedos (Rangel, 2000), sin embargo esta de altura varía en la región andina, debido a la biodiversidad de geformas y topografía que existe en esta zona, los páramos de la cordillera Oriental inician aproximadamente entre los 3000 y 3400 metros de altura mientras en la cordillera Occidental la presencia de páramos oscila entre 3200 -3600 metros con límites superiores alcanzan los 3960 metros y 4200 metros de altura, el rango latitudinal de presencia de este ecosistema abarca desde los 8° S en el Perú hasta los 11° N en el macizo de Santa Marta, Colombia, máxima avanzada latitudinal de la región paramera (Troll 1968)

De acuerdo a la clasificación de las provincias biogeográficas del mundo en Ecuador podemos encontrar la siguiente clasificación:

- Subpáramo (3100 a 3400 m), con vegetación dominante de árboles y arbustos (*Diplostephium*, *Hesperoneles*, *Vaccinium* y *Espeletia*) y un estrato de briofitas muy abundantes.
- Páramo propiamente dicho (3500 a 3900 m), con pastizales (*calamagrostis*, *Agrostis*, *Hypericum*), y elementos de bosque de cañada (*Alchemilla*, *polylepis*, *libanothamus* y *escallaria*).
- Superpáramo (encima de 3900), con vegetación compuesta por *Calamagrostis*, *Agrostis*, *Carex* y otras gramíneas, mezcladas con *Espeletia* y Briofitas".

Pero en Ecuador Cañadas (1993) declaró que la ecoregión de los páramos ecuatorianos es un continuo biológico, que se puede dividir en dos continuos biológicos, el subpáramo desde los 3000 metros de altitud en la cordillera occidental hasta los 3600 metros de altitud y en la cordillera oriental sobre los 3200 con un límite superior de 3900 metros de altitud, el páramo

comienza en los 3600 metros de altura y continua hacia arriba hasta las nieves perpetuas, también realiza una clasificación de las fajas en zonas de vida según Holdridge.

Utilizando un criterio estructural eclético para clasificar los páramos en el Ecuador, resulta que a más del páramo de pajonal existente en el territorio existen (Mena et al 2006):

- **Páramos de frailejones**, dominados por *Espeletia pycnophylla* en las provincias limítrofes con Colombia y en una población aberrante en el centro del país (Llanganates);
- Páramos húmedos hacia la hoya amazónica, donde los pajonales son remplazados por otras herbáceas como el bambú enano *Neurolepis aristata* y varias formadoras de almohadillas;
- Páramos secos sobre arenales, especialmente alrededor del Chimborazo, donde la paja más común (*Calamagrostis intermedia*) es remplazada en gran parte por *Stipa ichu*;
- Superpáramo en las montañas más altas, donde pocas especies vegetales pueden sobrevivir a las condiciones edáficas y climáticas sobre los 4.200 metros,
- Superpáramos azonales en los lahares del Cotopaxi y el Antisana, con una vegetación en sucesión temprana que, a elevaciones mucho menores, evoca los superpáramos verdaderos;
- Páramo arbustivo, endémico al Parque Nacional Podocarpus en el Sur del país.

1.1.1. Clima del Páramo

El páramo presenta un clima típico tropical de alta montaña caracterizada por bajas temperaturas y un balance hídrico positivo ocasionado por los altos índices de cobertura nubosa, niebla y precipitación horizontal, debido a su ubicación cerca del Ecuador, la radiación solar diaria es casi constante a lo largo del año, pero el ciclo diario presenta grandes variaciones (Beltrán, 2009).

La variación diaria de temperatura es mucho mayor que la de la temperatura a nivel estacional, con frecuentes heladas nocturnas. Estas condiciones solo permiten que el crecimiento se produzca durante cortos periodos de tiempo al día, por tanto, el establecimiento de plántulas es difícil. (Rivera, 2001)

Según Rivera (2001), algunos investigadores han propuesto como los principales indicadores para delimitar el sub-páramo la temperatura media anual de 10°C y con alta presencia de heladas. Según otras hipótesis de carácter eco-fisiológico, dicha franja está directamente relacionada con la poca disponibilidad de nutrientes y el exceso de acidez del suelo, la alta tasa de transpiración y las fluctuaciones constantes de temperatura, luminosidad, radiación y el número de días con heladas, lo que afecta directamente la descomposición de materia orgánica.

La franja de sub-páramo tiene una temperatura media mensual de 10,2°C, con una máxima de 17,3°C y una mínima de 3,1°C. La humedad relativa promedio es de 85% y la evaporación mensual de 82 mm; su precipitación promedio anual es de 1.716 mm, con una distribución biestacional (Rivera, 2001).

La variación de temperatura dentro del día en esta área es aproximadamente de 20°C que son comunes para estas zonas, estas variaciones típicas de temperatura determinan el rol de la escarcha y nieve debido a la falta de estacionalidad, la línea de nieve es muy abrupta e inestable a lo largo del año (Beltrán, 2009).

La variabilidad de temperatura en el páramo depende principalmente por el clima local, gradiente altitudinal y la humedad del aire, El lapso de proporción, el cual es el cambio en el promedio de temperatura con respecto a la altitud, está típicamente entre 0.6° y 0.7 °C por cada 100 m (Van der Hammen y Hooghiemstra, 2000; Castaño, 2002), pero se ha observado valores tan bajos como 0.5°C por cada 100 m (Bacuilima et al., 1999, Beltrán, 2009).

Contrariamente a la temperatura, la precipitación en el páramo es altamente variable, y fluctúa en un rango desde 700 mm hasta los 3000 mm (Luteyn, 1992), con algunos extremos en áreas limitadas, sobre los 6000 mm (Rangel, 2000). La variabilidad de lluvia a una escala pequeña está determinada principalmente por variaciones en la dirección y velocidad del

viento, las cuales están controladas por pendientes pronunciadas y la topografía accidentada y por las diferentes oscilaciones que se mencionaron anteriormente.

1.1.2. Flora y fauna del páramo

La vegetación incluida en el ecosistema páramo no es uniforme, comprende un conjunto de formaciones vegetales diferentes. (Josse, 2000), y aunque por el momento no se tienen información más precisa, un 10% de la flora del Ecuador podría estar representada en estas áreas (Jorgensen et al 1999), la variedad de características geográficas, geológicas, climáticas, fisonómicas y florísticas que se representan en el páramo lo convierten en una zona rica y diversa en varios aspectos (Leon 1993).

Las plantas de los páramos tienen una morfología característica: rosetas gigantes y enanas, penachos de gramíneas, almohadillas, alfombras, arbustos enanos y postrados son algunas formas de crecimiento de las plantas en esta zona (Hedberg y Hedberg 1979, Mena y Balslev 1986, Hedberg 1992, Ramsay y Oxley 1997).

Tabla 1. 1. Familias más diversas en géneros y especies de varios grupos de plantas en los páramos (fuente: Luteyn, 1999)

GRUPO	FAMILIA	NUMERO	
		GENERO	ESPECIES
Planta con flores, cinco familias con mayor diversidad en los páramos 447 géneros, 3045 especies	Asteraceae	101	858
	Poaceae	41	27
	Orchidaceae	24	152
	Ccrophulariaceae	15	144
	Melastomataceae	9	107
Helechos y afines	Dryopteridaceae	5	77
Musgos	Dicranaceae	17	67
Hepaticas	Lejeuneaceae	16	38

Existen 49 especies de mamíferos en los páramos ecuatorianos (Tirira 1999). Muñoz *et al.* (2000) señalan que para Colombia los datos son los siguientes: 21 familias, 46 géneros y 70 especies. Los datos colombianos se refieren a altitudes desde los 3.000 m y posiblemente la

diferencia no sea tan grande. En general, los mamíferos de los páramos son difíciles de observar. Los más comunes seguramente son los conejos (*Sylvilagus brasiliensis*).

Las aves es el grupo de vertebrados terrestres más diverso en el país también lo es en el páramo. Según Carrión (2000), el número total de aves en el páramo ecuatoriano es de 88, pero si se restringe este número a las especies que viven únicamente en los páramos del país, el número llega a 24. En otras palabras, un 70% de las aves que viven en los páramos también se encuentran en otras regiones más bajas. Una lista de todas las aves del páramo tomaría demasiado pero destacamos el cóndor andino (*Vultur gryphus*).

Castaño *et al.* (2000) indica que para los anfibios existe, tres especies de salamandras y 87 especies de sapos, siendo la familia Leptodactylidae la más diversa. En cuanto a reptiles, en Colombia hay registros de 11 especies de saurios en tres familias y cuatro de serpientes en una familia lo cual puede ser igual debido a las características climáticas de estas áreas en Ecuador.

1.1.3. Servicios ecosistémicos del páramo y su historia

La importancia social del ecosistema páramo se manifiesta en la gran suma de personas que utilizan de éste para cubrir necesidades básicas dentro de la sociedad, como el uso de productos que permiten su subsistencia (Beltrán, K., 2010); es así que en el tema económico, los beneficios son amplios y se los relaciona con la productividad que proporciona el suelo, la serie de cultivos propios (tubérculos andinos) que se dan a estas alturas, los animales que crecen en esta zona que proveen de carne, leche, lana, fibra, etc. a las personas que habitan el Páramo, así como, el comercio de los mismos (Beltrán et al. 2009), hacen que este ecosistema constituya un sitio con alto potencial para varias actividades y generación de recursos económicos no tradicionales para las comunidades que lo habitan.

En la antigüedad en el Ecuador este ecosistema era considerado como tierra improductiva o tierra hostil con poca oferta. Los pajonales eran vistos como zonas pobres y nada interesantes (Carpio et al. 2007). También al hablar de “páramo” se hacía referencia a gente pobre con problemas económicos y sociales (Mena et al. 2008). Actualmente, debido a la falta de conocimientos de mucha gente, este ecosistema es uno de los más amenazados (Mena et al. 2008) –principalmente- por la expansión agrícola de las zonas de cultivo, las prácticas

pecuarias entre ellas: quemas, sobrepastoreo, introducción de especies exóticas, minería, caza, entre otras, convirtiéndolo en una zona de pastizales pobres y fragmentados.

Los páramos son “ecosistemas naturales de mayor altitud e irradiación solar del planeta y los servicios que brindan este tipo de ecosistema al bienestar humano se relacionan en: (EEM, 2005).

- **Regulación del clima.**

Es posible que una de las funciones más importantes de los humedales radique en la regulación del cambio climático global. Por ejemplo, se estima que las turberas, que solo cubren el 3 a 4 % de la superficie terrestre, almacenan 540 gigatoneladas de carbono, lo que representa un 1,5% del total de carbono almacenado a nivel mundial y alrededor de un 25% a 30% del que está contenido en la vegetación terrestre.

El servicio de fijación de carbono ha tenido mucha atención por la expectativa de contar con un esquema mundial para su negociación, que requiere estimaciones *ex ante* y verificaciones *ex post* exactas del carbono fijado. En los ecosistemas de montaña el interés debe ser mayor ya que no solamente tienen gran potencial para fijar carbono sino que se ha comprobado que sobre los 5000 msnm. Se espera que la temperatura suba de 5 a 6 grados en estos ecosistemas en los próximos 100 años (de Koning, 2007). Este fenómeno sumado a otros procesos ocasionará (aunque en algunos ya se ve este fenómeno) el derretimiento de glaciares, cambios en los regímenes de lluvias, aumento de la frontera agrícola y el incremento de olas de calor e incendios forestales, entre otros (Schutze, 2007).

- **Servicio de fijación de carbono**

El ecosistema páramo tiene la característica de poseer un suelo de alto contenido de carbono y eso le da la posibilidad de almacenar una gran cantidad de agua. Es decir, el suelo del páramo se constituye en un enorme reservorio de carbono, el cual ha sido almacenado allí desde hace miles de años. Según Hofstede (1999), en el suelo del páramo de El Ángel (Ecuador) se puede encontrar hasta 1700 ton de carbono por hectárea, pero en suelos de páramo en Chimborazo (Ecuador) la cantidad de carbono en el suelo disminuye hasta en un 84% (Buytaert et al., 2006)

- **Purificación del agua.**

Tienen una función clave en el tratamiento y detoxificación de una variedad de desechos, se ha establecido que algunos humedales pueden reducir las concentraciones de nitratos en más de un 80%

- **Servicios Culturales.**

Los humedales proporcionan beneficios estéticos, educacionales, culturales, espirituales, así como una amplia gama de oportunidades para la recreación y turismo, en el páramo de El Ángel es uno de los principales atractivos turísticos del norte del país, y para los poblados ubicados en el área juega un papel preponderante en el apoyo de economías rurales.

- **Servicios Hidrológicos.**

Proporcionan una amplia gama de este tipo de servicios como ejemplo, lagos, pantanos, ciénegas contribuyen al control de las inundaciones, aportan a la recarga de aguas subterráneas y acuíferos, son los principales reguladores de caudales pero la valoración de los mismo varía según los distintos tipos de humedales, además se debe mencionar su efecto en el ciclo hidrológico, y por lo tanto su relevancia en la disposición de agua para personas y los múltiples usos que hacen con ella, incluyendo el riego, energía etc.

El servicio de provisión de agua en el bosque andino se debe a dos factores: precipitaciones relativamente altas y bien distribuidas a lo largo del año y una baja evapotranspiración (Tobón, en prensa). La precipitación se condiciona por variables topográficas y por procesos climáticos locales y regionales. Normalmente la precipitación anual varía en niveles entre 600 a 6000 mm. Según información de Oesker, 2008 (en Tobón, en prensa) por cada 100 metros de elevación la precipitación aumenta en 150 mm, hasta los 2600 m s.n.m. Sumado a este proceso la precipitación horizontal añade 40 mm por cada 100 metros, siendo este un factor muy importante ya que tanto el dosel del árbol así como las epifitas (musgos y líquenes) absorben y retienen la humedad, para luego liberarla por goteo. En las épocas secas la precipitación secundaria por captura de niebla es muy importante, como lo resalta Buytaert et al. (2006), porque viene a ser el único suministro de agua al sistema hidrológico. Aunque se desconoce cuánta agua es interceptada por epifitas y cuánta llega a los arroyos, se ha

estimado que pueden agregar de 5 a 20% adicionales. Estas estimaciones igualmente se registran en bosques nublados en el Asia (Bruijnzeel, 2004). Un caso interesante es el identificado por Hemps (en Tognetti, 2008) en el Kilimanjaro donde debido a quemas continuas se ha perdido 15000 ha de bosque nublado lo que se calcula incidió directamente en la disminución de 20 millones de m³ de agua.

Por otro lado, el páramo es un ecosistema con una vocación particular para almacenar agua y para distribuirla constantemente en el año. Adicionalmente el agua que sale del páramo es de muy buena calidad. El suelo es un factor clave en el almacenamiento debido a la alta carga orgánica. Buytaert et al. (2006) estiman que el monto de carbono encontrado en suelos de páramo (Andosoles) usualmente es de 100 g/kg y en zonas Información disponible sobre servicios de ecosistemas de montaña en los Andes del Norte y Centro húmedos alcanza hasta un 40% adicional, lo que incide en la capacidad para almacenar el agua. Es así que la humedad del suelo saturado normalmente se ubica entre 0.8 y 0.9 g/g. El suelo del páramo también tiene una estructura porosa con alta conductividad hidráulica. La producción de agua del páramo es una pregunta usualmente realizada.

Buytaert y sus colaboradores (2006) indica que en Colombia se estima que la producción de agua en el páramo es 665 mm al año mientras que en algunas regiones del Ecuador la producción está entre 600 y 1000 mm al año que es el equivalente a los 2/3 de la lluvia anual, la cual se debe a una precipitación elevada (que va entre 700 y 3000 mm) y bien distribuida a lo largo del año.

- **Servicios de Biodiversidad**

Existe una cantidad muy alta de especies que dependen de este tipo de ecosistemas, en los páramos no se encuentran cuantificados y aunque se puede decir que son reducidos el número de especies y su variedad este sistema presenta una fragilidad inexplicable ante otros tipos de ecosistemas.

En términos de almacenamiento de agua, la presencia de epifitas es fundamental para este servicio. Tobón (2007) identifica algunos estudios como Köhler et al. (2004), que dan a las epifitas la capacidad de almacenar hasta 420% de su biomasa seca, sin embargo, Tobón et al., (2007a) menciona que el almacenamiento puede estar en el rango de los 320 a 390%,

Venekl aas & Van Ek (1990) de su biomasa seca 2 a 5 mm almacenados identificados por y 200% y 500% de su biomasa seca por Nadkarni (1984).

- **Servicios de apoyo.**

En la formación de suelos debido a la retención de sedimentos y acumulación de la materia orgánica, El suelo es el principal reservorio de almacenamiento de agua tanto para el bosque andino (Tobón, 2007), como para el páramo que presenta un suelo con excepcionales características hidrofísicas (Buytaert et al., 2006).

Los bosques presentan una mayor intercepción, mayor evapotranspiración y resistencia aerodinámica, comparado con cultivos y pastizales. Sin embargo, incrementan la humedad atmosférica y por lo tanto existe mayor posibilidad de formación de nubes y generación de precipitación (André et al., 1989; Pielke et al., 1998 en Tobón, 2007).

1.1.4. Hidrología del Páramo

- **El suelo**

Muchas veces a las regiones montañosas se las describe como “las torres de agua del mundo” (Mountain Agenda, 1998), el páramo consiste de planicies y valles accidentados de origen glaciar con una gran variedad de lagunas, pantanos, pradera húmeda con poca presencia antrópica debido al clima existente en estas áreas, el agua producida en estos ecosistemas es de excelente calidad, a pesar de la importancia de estas áreas, la hidrología del páramo es muy poco estudiada, con un agravante principal que es la inexistencia de datos meteorológicos e hidrológicos. (De Bievre et al 2006).

Hasta la actualidad el aprovechamiento de agua no ha causado problemas de desabastecimiento, debido a que las ciudades se encuentran ubicadas cerca a los páramos cercanos con alta producción de agua, pero en un escenario futuro el incremento de la población en el estándar de vida junto con actividades antrópicas y económicas incrementarán la demanda de agua por lo cual el equilibrio alcanzado entre la oferta y demanda colapsará.

Las bajas temperaturas que dominan el clima en esta área evita que la materia orgánica se descomponga rápidamente, genera una estructura tridimensional especial que funciona como una esponja que cumple con mantener el servicio ambiental de captación y distribución de agua hacia las tierras bajas (Mena & Hofstede, 2008).

A pesar de la compleja geología y topografía, los suelos del páramo son relativamente homogéneos. El tipo de suelo y las propiedades son principalmente determinadas por dos factores: (1) el clima, y (2) la existencia de una capa homogénea de cenizas de erupciones volcánicas del cuaternario (Barberi et al., 1988; Sauer, 1957; Winckell et al., 1991; Buytaert et al., 2005b; Colmet-Daage et al., 1967). El clima frío y húmedo, y la baja presión atmosférica favorecen la acumulación de la materia orgánica en el suelo.

Los suelos son generalmente clasificados como Andosoles en la “World Reference Base for Soil Resources” (FAO/ISRIC/ISSS, 1998), o Andisoles en la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003). En áreas más saturadas por agua o en zonas con menor influencia volcánica, se desarrollan Histosoles. (Buytaert, 2004). En zonas más empinadas o donde hay afloramientos de roca, son más los Regosoles (Dercon et al., 1998).

El carbón orgánico típicamente está alrededor del 10 % (Poulenard et al., 2003). En sitios húmedos (>900 mm año⁻¹), contenidos de C orgánico por encima del 40 % no son nada raros (Buytaert et al., 2005b; Podwojewski et al., 2002).

Como un resultado de la baja densidad aparente y de la estructura abierta y porosa, los suelos del páramo tienen una capacidad de retención de agua muy alta (80-90 % en saturación) (Buytaert, 2004; Iñiguez, 2003). Esto se puede entender mejor cuando se comparan las curvas de retención de humedad de los Andosoles con las correspondientes a los suelos “comunes”, éstos son todos aquellos suelos que están concentrados en el rango comprendido entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos.

Aplicando varias técnicas *in situ* y laboratorio (permeámetro de carga constante, método del pozo invertido y tensio-infiltrómetro para la determinación de la conductividad hidráulica de los suelos dan resultados similares en el valor promedio y el rango de variación (Buytaert, 2004).

Adicionalmente, la conductividad hidráulica en este caso no saturada (K) cae abruptamente con la aplicación de succiones bajas. En experimentos de campo con el infiltrómetro de tensión, Buytaert et al. (2005a) observó una reducción de la conductividad hidráulica desde 5.3 mm h^{-1} a -3 cm de succión hasta 0.52 mm h^{-1} a 0.5 cm . Esta es una reducción mucho más brusca que en otros suelos, esta característica podría ser la responsable del flujo base existente del agua en el suelo del páramo (De Bievre et al 2006).

- **Producción de agua y almacenamiento**

El servicio de provisión de agua en el bosque andino se debe a dos factores: precipitaciones relativamente altas y bien distribuidas a lo largo del año y una baja evapotranspiración. La precipitación se condiciona por variables topográficas y por procesos climáticos locales y regionales como son: la Zona de Convergencia Intertropical, la Variabilidad Anual y Decadal. Normalmente la precipitación anual varía en niveles entre 600 a 6000 mm. Según información de Oesker, 2008 por cada 100 metros de elevación la precipitación aumenta en 150 mm, hasta los 2600 m s.n.m. Sumado a este proceso la precipitación horizontal añade 40 mm por cada 100 metros, siendo este un factor muy importante ya que tanto el dosel del árbol así como las epifitas (musgos y líquenes) absorben y retienen la humedad, para luego liberarla por goteo. En las épocas secas la precipitación secundaria por captura de niebla es muy importante, como lo resalta Buytaert et al. (2006), porque viene a ser el único suministro de agua al sistema hidrológico. Aunque se desconoce cuánta agua es interceptada por epifitas y cuánta llega a los arroyos, se ha estimado que pueden agregar de 5 a 20% adicionales. Estas estimaciones igualmente se registran en bosques nublados en el Asia (Bruijnzeel, 2004). Un caso interesante es el identificado por Hemps (en Tognetti, 2008) en el Kilimanjaro donde debido a quemas continuas se ha perdido 15000 ha de bosque nublado lo que se calcula incidió directamente en la disminución de 20 millones de m^3 de agua.

Por otro lado, el páramo es un ecosistema con una vocación particular para almacenar agua y para distribuirla constantemente en el año. Adicionalmente el agua que sale del páramo es de muy buena calidad. El suelo es un factor clave en el almacenamiento debido a la alta carga orgánica. Buytaert et al. (2006) estiman que el monto de carbono encontrado en suelos de páramo (Andosoles) usualmente es de 100 g/kg y en zonas húmedas alcanza hasta un 40% adicional, lo que incide en la capacidad para almacenar el agua. Es así que la humedad del

suelo saturado normalmente se ubica entre 0.8 y 0.9 g/g. El suelo del páramo también tiene una estructura porosa con alta conductividad hidráulica. La producción de agua del páramo es una pregunta usualmente realizada. Buytaert y sus colaboradores (2006) indican que en Colombia se estima que la producción de agua en el páramo es 66.5 km³ al año mientras que en algunas regiones del Ecuador la producción está entre 600 y 1000 mm al año que es el equivalente a los 2/3 de la lluvia anual, la cual se debe a una precipitación elevada (que va entre 700 y 3000 mm) y bien distribuida a lo largo del año.

Como resultado de la baja evapotranspiración, hay un gran excedente de agua, alimentando los ríos que descienden hacia las regiones costeras y a la cuenca Amazónica. Junto a una alta producción de agua, la capacidad de regulación de agua del páramo es casi legendaria entre agricultores y científicos (Hofstede, 1995; Medina y Vásquez, 2001; Poulenard et al., 2001; Harden, 2001; Sarmiento, 2000; Poulenard et al., 2003; Podwojewski et al., 2002; Luteyn, 1992). De hecho muchos ríos de páramo proveen un flujo base sostenido a través del año (Buytaert et al., 2004). Es improbable que la vegetación predominante, de pajonales y pequeños arbustos, tenga un mayor impacto en la regulación de agua. El flujo base sostenido es atribuido principalmente al clima, la topografía y los suelos.

En la literatura, se da el mayor crédito de la alta regulación de agua a los suelos del páramo (Medina y Vásquez (2001); Poulenard et al. (2003); Luteyn (1992)). La estructura del suelo muy ligera y porosa y la extraordinaria capacidad de almacenamiento de agua confirman la habilidad del suelo para una buena regulación de agua. En la figura 2, se puede observar como la humedad básicamente no varía a pesar de la variabilidad de la lluvia.

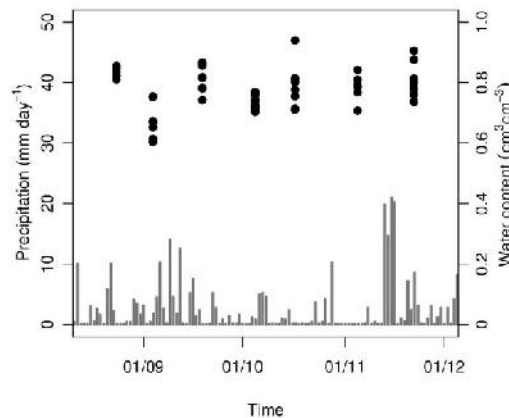


Figura 1. 2. Contenido de agua actual de los suelos de la microcuenca de Huagrauma sobre el tiempo (*), comparado con la precipitación (barras), (Buytaert , 2004).

1.1.5. Actividades Antrópicas y el cambio de la hidrología del páramo

Las diferentes actividades antrópicas que se realizan en áreas de páramo afectan seriamente a la hidrología del mismo ya que cambian la estructura del suelo y ponen serios limitantes para la conservación del mismo, hay que mencionar que las actividades relevantes que afectan a estas áreas tiene que ver con: siembras, reforestación, y ganadería, lo que ha cambiado el uso del suelo por nuevas matrices productivas.

El ecosistema páramo constituyen en uno de los más importantes proveedores de servicios ecosistémicos fundamentales para sustentar la vida (Campos et ál. 2006). Con base en evidencias científicas disponibles, es claro que el bienestar de la humanidad depende en gran medida del flujo de servicios que los ecosistemas naturales brindan (MEA 2005).

El incremento de la actividad humana se ve reflejado en el ciclo del agua lo cual causa un impacto directo sobre la hidrología, según Buytaert (2002) el páramo pierde una capacidad de almacenamiento de agua cuando existe siembras del 35% y la presencia de pasturas afecta a la reducción en un 40%, lo cual ha incrementado en las últimas décadas, las actividades antrópicas han introducido cambios sin precedentes en este ecosistema con el fin de satisfacer las crecientes demandas de agua, alimento y energía.

1.2. SELECCIÓN DEL MODELO.

Considerando el tamaño de la cuenca, la disponibilidad de datos meteorológicos en su mayoría a escala diaria o mensual y la relevancia del cálculo del balance de agua para la gestión de recursos hídricos, para la investigación se utilizarán un modelo hidrológico semi-distribuido basado en el método de la SCS Curva Número. El desarrollo de un modelo no es el objetivo de esta tesis, por lo que se utilizará el modelo existente SWAT (Neitsch *et al.*, 2002^a, Neitsch *et al.*, 2002^b), el cual es de acceso libre, ha sido aplicado en una gran cantidad

de países (Chaubey *et al.*, 2005, Hattermann *et al.*, 2005, etc.), ofrece interesantes opciones como un generador climático, se ha realizado investigación sobre calibración automática (Van Griensven y Bauwens, 2005) y su aplicación como herramienta de modelación hidrológica se puede extender para incorporar aspectos relevantes para la gestión y temas de calidad de agua. Además la comunidad científica (Arnold y Fohrer, 2005) reconoce que aún quedan tareas científicas que realizar en aspectos tales como el rendimiento del modelo y sensibilidad a los parámetros de ingreso.

1.2.1. Selección del periodo de estudio y las opciones básicas de modelación

El período del estudio y las opciones de modelación se definen en función de los objetivos del proyecto y de los datos de entrada disponibles. El sistema más completo de datos meteorológicos y de caudales para el área de estudio corresponde al período 1976-2008. A partir de estos 32 años de datos, dentro de los cuales se estimará periodos para la puesta en marcha del modelo, calibración del modelo y la validación.

Como están disponibles datos diarios para la mayoría de las estaciones, el método de SCS Curva Número será utilizado para la estimación de la escorrentía. Debido a que la información sobre otros parámetros meteorológicos se limita principalmente a datos diarios de temperatura, el método de Hargreaves se empleará para calcular la evapotranspiración.

Se utilizará el módulo de Uso de Suelo de SWAT para realizar los escenarios para la evaluación de la vulnerabilidad. En el caso del rastreo del caudal se utilizarán los dos métodos incluidos en SWAT y se compararán los resultados.

1.2.2. Configuración del modelo SWAT

Se utilizará la versión más reciente del paquete de software de ArcSWAT (Di Luzio *et al.*, 2002). El cual provee un completo preprocesador, interface gráfica y pos procesador implementado dentro de ArcGis 10.1. ArcSWAT se distribuye como una extensión de dominio público del modelo SWAT2009.

1.2.3. Preparación de los datos espaciales básicos

El primer paso en la construcción del modelo para el área de estudio dentro de la cuenca del río El Ángel, será la aplicación de herramientas estándar de SIG proporcionadas dentro de ArcSWAT para la delimitación automática de la cuenca. Para este propósito se cuenta con

una versión hidrológicamente corregida, del Modelo de elevación digital (DEM) SRTM 30m ajustado con puntos aéreo triangulados del Instituto Geográfico Militar para el norte de Ecuador. La acumulación de flujo es calculada del DEM y utilizada en la extracción automática de la red fluvial para el modelo. Dentro de esta red se ubicarán los puntos de calibración, y corresponden a puntos en los cuales existen series de caudales disponibles del Instituto Nacional de Meteorología INAMHI. A continuación se extraen automáticamente las sub-cuencas (procedimiento SIG estándar). El resultado obtenido de la extracción de las sub-cuencas depende de los puntos definidos como salidas y el valor definido por el usuario como umbral para la acumulación de flujo. Las capas SIG obtenidas del proceso mencionado se validarán mediante comparación visual con shapfiles del SIGAGRO escala 1:50000 (cuenca, sub-cuenca, sub-sub-cuenca y red pluviométrica). Después, dentro de cada sub-cuenca, se deben definir las HRUs, para lo cual se utilizan un mapa de suelos, mapa de cobertura y uso del suelo (todas las capas temáticas en escala 1:10000).

En cuanto al número de tipos de suelo, este puede ser reducido en función de la información disponible para determinar los grupos hidrológicos para cada serie (requerido para cálculo CN), Al no existir datos secundarios sobre la permeabilidad de los suelos de paramo se utilizará para el levantamiento de información de permeabilidad en las diferentes unidades de suelos la metodología de minidisco que se encuentra basado en el análisis e interpretación de Geología, Morfología Ambiente, Capacidad de Uso y Pendientes para la identificación de áreas homogéneas, con lo cual se aplicara funciones de pedotransferencia para la extrapolación de datos en áreas donde no fue posible el levantamiento de información in situ (Allende et al., 2007. Sinoga et al, 2003. Zhang, 1997)

En la definición de sub-cuencas y HRUs, el nivel de discretización espacial es definido por el usuario. Dependiendo del valor elegido para el umbral, se tendrán una mayor o menor cantidad de unidades espaciales. Éstas afectarán la resolución espacial del modelo y su desempeño (Mamillapalli *et al.*, 1996; Thielen *et al.*, 1999 en Heuvelmans *et al* (2005)).

Aunque no es un objetivo directo del proyecto, se evaluará la influencia de los valores del umbral en la repuesta del modelo, previo a la calibración, por lo que el modelo será corrido para 2 distintas sub-cuencas y HRUs, con lo que se logrará determinar la producción de agua que existe en el páramo del Angel y ver su influencia sobre el caudal total disponible para las

diferentes actividades antrópicas y se realizará el análisis de sensibilidad correspondiente con la información secundaria existente, ya que no existen estudios hidrológicos en esta área así como se analizará la influencia sobre los caudales en la intervención de estas áreas..

Para la modelación estándar, las series meteorológicas observadas serán asignadas a cada sub-cuenca en base al criterio de la mínima distancia, entre el centroide de la sub-cuenca y la ubicación de la estación (Francos *et al.*, 2003).

1.2.4. Especificación del valor de Curva Número

La escorrentía superficial ocurre cuando que la aplicación de agua en la superficie del suelo excede la capacidad de infiltración. Inicialmente cuando el agua esta aplicado a un suelo seco las tasas de infiltración son muy bajas con escorrentía alta pero esto cambia a medida que la humedad en el suelo incrementa hasta que ocurre saturación.

Swat contempla dos métodos de cálculo de este componente. El primero es la Curva Número (SCS, 1972) y el método de Grenn & Ampt para infiltración (1911), éste último tiene la particularidad de tener datos de ingreso subdiarios, por esta razón en este estudio se ejecutará el método de la curva número.

A cada tipo del suelo contenido en el mapa de suelo se asigna uno de cuatro grupos hidrológicos posibles (A, B, C o D), basado en una descripción oficial de la textura del suelo de OSTROM (1976). Esta información es combinada con el mapa de la uso del suelo, para obtener un valor de Curva Número para cada combinación de la uso del suelo y tipo de suelo. Para este propósito, se adaptan valores a las condiciones locales, basados en: (a) valores de Curva Número que vienen incluidos en una base de datos en SWAT; (b) información de literatura internacional; (c) revisión de experiencias anteriores de usos en Ecuador; y (d) la evaluación de los valores preliminar de CN asignados valores de CN a través de calibración y validación del modelo para la cuenca del Ángel.

1.2.4.1. Infiltración

Para incorporar los grupos hidrológicos determinados por SWAT mediante el método de la curva número se generó cartografía de permeabilidad de suelos debido a que la permeabilidad

de suelos en el ecosistema paramo en el área de estudio no existe es por esta razón que se desarrolló la siguiente metodología.

El proceso de la infiltración puede describirse en forma cuantitativa resolviendo la ecuación de transporte completa (Richards, 1931) o considerando una relación entre infiltración acumulada y tiempo, expresada en función de parámetros de base física o empíricos (Haverkamp et al, 1990). Existen diversos instrumentos de campo para la medida de la velocidad de infiltración (Reynolds, 1993; Angulo Jaramillo et al., 2000). La mayor parte de ellos proporcionan información acerca de la conductividad o la infiltración referida a un área relativamente pequeña. En consecuencia, es difícil determinar la variación espacial de estos parámetros, así como evaluar la influencia que puedan tener factores, como por ejemplo, la cobertura vegetal, la presencia de macroporos, o de sistemas de grietas en el proceso de recolección de datos, sobre todo si generan heterogeneidad a escala más amplia que la de medida.

El propósito de la metodología planteada puede considerarse como un modelo geográfico que integra datos relacionados con el funcionamiento hídrico de una cuenca y en consecuencia el modelo puede ayudar a la estratificación del terreno para la toma de muestras asociadas a las pruebas de infiltración (Allende & Mendoza 2007). La utilización de cartografía temática ayudó a generar información concisa y sistemática sobre las formas de terreno, procesos geomorfológicos, estructura, composición y dinámica de los suelos y el agua, así como de los fenómenos naturales relacionados (Meijerink 1988; Zinck 1988), de esta manera la información generada en la cartografía temática integra valiosa información en la evaluación de los recursos naturales.

El estudio de la permeabilidad del suelo y su variabilidad espacial es imprescindible para el planeamiento racional de las actividades agropecuarias (Coelho 1974, Willis et al., 2011). Debido a su complejidad y alto costo se han desarrollado múltiples técnicas para su análisis cuantitativo entre las que destacan el infiltrómetro de doble anillo e infiltrómetros de disco (Sivapalan, et al., 1986). Por lo cual el enfoque de permeabilidad de suelos propuesto en este estudio está fundamentado en la perspectiva geopedológica para el levantamiento de información (Zinc, 1988; Farshad et al 2005; Allende et al 2007), utiliza la integración sistémica del conocimiento de la morfología, geología y pendiente con la finalidad de

identificar áreas de similares características, con suelos aptos para riego y susceptibilidad a la erosión (Zinck 1988).

Existen diversas concepciones en la interpretación de este parámetro por lo cual será mejor concebido si se comprende claramente las diferencias existentes entre los conceptos de permeabilidad, infiltración y conductividad hidráulica.

La infiltración se refiere a la entrada máxima de agua en el perfil de suelo tomada desde la superficie a una condición dada; se distingue del proceso de percolación por que este último es el movimiento del agua hacia abajo desde o a través de la zona no saturada (Monsalve 2006), la infiltración constante es cuando el suelo incrementa su humedad hasta alcanzar un valor constante, tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad del suelo, antes de la introducción de agua desde la superficie, tasa final de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo se define como: "los metros por unidad de tiempo de agua que entra en el suelo independiente de los tipos o valores, gradientes", velocidad de infiltración se denomina a la velocidad con que el agua penetra el suelo.

La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él, por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Tiene las dimensiones de velocidad metros por día de agua filtrándose en el suelo por la fuerza de gravedad o en unidades del gradiente hidráulico (Babalola 1978, Ankeny 1992).

La Permeabilidad es la velocidad de infiltración para un gradiente unitario de carga hidráulica en un flujo saturado a través de un medio poroso y está afectado por factores como infiltración de agua, cobertura vegetal, etc. No depende de las condiciones del contorno, pero si principalmente del tamaño y distribución de los granos del suelo y de la temperatura del agua (Monsalve 2006),

Por estas definiciones se entiende que la infiltración y conductividad hidráulica son aparentes, ya que dependen específicamente del tiempo y al ser clasificadas por su distancia en unidad de tiempo se considera como permeabilidad.

1.2.5. Preparación de la base de datos meteorológica e hidrológica

En el caso de las series incompletas, éstas se rellenarán utilizando un algoritmo de interpolación, el cual debe ser físicamente entendible, parsimonioso y apropiado a los datos disponibles, las características geográficas y climáticas del área y la escala utilizada (Garen y Marks, in press). Es por lo anterior que para el caso de las precipitaciones se utilizará el método de Kriging y Spline (para comparación) que se encuentran altamente sustentados con bibliografía para este tipo de variables y para las temperaturas se utilizará la tasa de variación de la temperatura con la altura (Temperature lapse rate), la cual se determinará en base a los datos de temperatura y elevación, disponibles para las diferentes estaciones. Una vez realizado el relleno de las series, se realizará una validación cruzada de los datos obtenidos (López-Moreno y Nogués-Bravo, in press). Además en el caso de temperatura se corroborarán con datos provenientes de Worldclim que es una base de datos que posee un set de capas climáticas (grillas de 1 km²) para el mundo, donde se indican entre otros temperaturas máximas y mínimas y se encuentran en escala mensual.

1.3.VULNERABILIDAD

El concepto de vulnerabilidad definido por el IPCC (2001) menciona que “el grado al cual una unidad de exposición o sistema es susceptible de, o es incapaz de, afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos extremos”. La vulnerabilidad es función de la exposición del sistema y depende, también, de la sensibilidad así como de la capacidad adaptativa del sistema. Esta idea se resume de la siguiente forma:

$$\text{Vulnerabilidad} = f(\text{Exposición, Sensibilidad, Capacidad Adaptativa})$$

Donde se entiende por unidad de exposición, la actividad - grupo, región o recurso - expuesta a variaciones climáticas significativas. Por sensibilidad, el grado al cual un sistema es afectado, negativa o positivamente, por los eventos climáticos, y por capacidad adaptativa, la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos climáticos; esta habilidad le permite moderar el daño potencial, tomar ventaja de las oportunidades y resistir o hacer frente a sus consecuencias.

Tyndall Centre for Climate Change Research (2003), plantea que las siguientes categorías son una de las maneras de diferenciar las definiciones de vulnerabilidad: a) en términos de la cantidad o daño potencial causado a un sistema por un evento o amenaza relacionado con el clima y b) como el estado que existe dentro de un sistema antes de entrar en contacto con un evento o amenaza relacionados con el clima.

Una definición muy utilizada se refiere a la vulnerabilidad como el grado al cual un sistema, subsistema o componente de un sistema tiene la posibilidad de experimentar daño como consecuencia de su exposición al riesgo, a una perturbación o a un factor de estrés, (Turner II et al., 2003) pero según el tercer informe de IPCC (McCarthy et al., 2001), vulnerabilidad es el grado en que un sistema es capaz de enfrentar los efectos del cambio climático, incluyendo vulnerabilidad climática y sus extremos.

Con el objetivo evaluar la vulnerabilidad hídrica el presente proyecto se propone dos metodologías de cálculo de indicadores del balance hídrico a nivel de subzonas hidrográficas, así como su estimación, los indicadores mencionados son: índice de escasez por zona hidrográfica (HRU) e índice de aridez por disponibilidad de agua para condiciones hidrológicas promedio en rangos de tiempo. La aplicación de la metodología mencionada para la elaboración de los mismo será la realizada por el IDEAM 2008 el cual analiza en Colombia diferentes metodologías para la aplicación de tendencias y escenarios hidrológicos en condiciones bastante similares al ecosistema que se está estudiando la información de los diferentes parámetros que se involucraran en los diferentes cálculos será la que se obtenga del balance hidrológico generado por SWAT.

1.3.1. Índice de Aridez

El índice de aridez es un indicador cuantitativo del déficit de agua que existe en una región en función de su régimen hidroclimático. Este indicador relaciona tres variables climáticas: Precipitación, Temperatura y evaporación. Siendo derivado de variables climáticas el índice de aridez tiene un significado importante para la oferta hídrica ya que la energía disponible (expresada en términos de evaporación potencial) y la precipitación influyen significativamente en la evapotranspiración real y en la escorrentía superficial de las cuencas,

La metodología utilizada en este trabajo es Thornthwaite (1948) debido a la disponibilidad de datos que se encuentran disponibles en el país.

Existe un gran número de propuestas para definir el índice de aridez, que se han realizado de acuerdo con la naturaleza del proceso que pretende describir el índice. Algunos índices deben su formulación a características de la vegetación, otros sólo al régimen de precipitación o al de temperatura por separados. En la actualidad se reconocen cerca de treinta ecuaciones que pretenden definir la aridez de las distintas regiones del mundo. Como primer trabajo sobresale la clasificación de W. Köppen, que definía la aridez de acuerdo con la presencia o ausencia de especies vegetativas (1900), en el mismo año V.V. Dokutchaev lo definió cualitativamente como la relación entre la precipitación y la evaporación desde una superficie de agua. La primera definición cuantitativa del índice de Aridez la realizaron al mismo tiempo E.N. Transeau y G.N. Visotsky en 1905. Estos autores propusieron el índice de aridez como el cociente entre la precipitación (P) y evaporación (E) anuales

$$Ia = \frac{P}{E} (1-1)$$

Tabla 1. 2. Categorización del índice de aridez (ENA, 2000).

CATEGORIA	RANGO
ALTAMENTE DEFICITARIO	> 0.6
DEFICITARIO	0.59 - 0.59
NORMAL Y DEFICITARIO DE AGUA	0.40 - 0.49
NORMAL EN AGUA	0.30 - 0.39
EXCEDENTE DE AGUA	< 0.15

1.3.2. Índice de escases a nivel de unidad hidrológica de respuesta

Con el fin de evaluar la relación entre la oferta hídrica neta y las condiciones de demanda para las distintas unidades de análisis, fueron calculados los índices de escasez, el cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$Ie = \frac{D}{O} \times 100\% (1-2)$$

Dónde:

I_e - Índice de escasez [%], D - Demanda total de agua [m^3], O - Oferta hídrica superficial neta [m^3].

En la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo se distinguen las siguientes categorías de presión sobre el recurso hídrico, estipulado por la UNESCO:

- a) Alta – la demanda alcanza el 40% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora.
- b) Media – el nivel de demanda de agua se encuentra entre el 20 y 40% de la oferta.
- c) Moderada – Los requerimientos de agua están entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica.
- d) Baja – la demanda de agua no supera el 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente.

Los resultados del índice de escasez obtenidos son comparables con el indicador de presión que se utiliza a nivel internacional.

1.4. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La unidad de estudio seleccionada corresponde a la microcuenca del Ángel, ubicada en el territorio ecuatoriano, en la provincia del Carchi, su mayor área de influencia se encuentra en el Cantón Espejo, el área total de esta microcuenca es de 256.76 km^2 . (Figura 1-3 A y B)

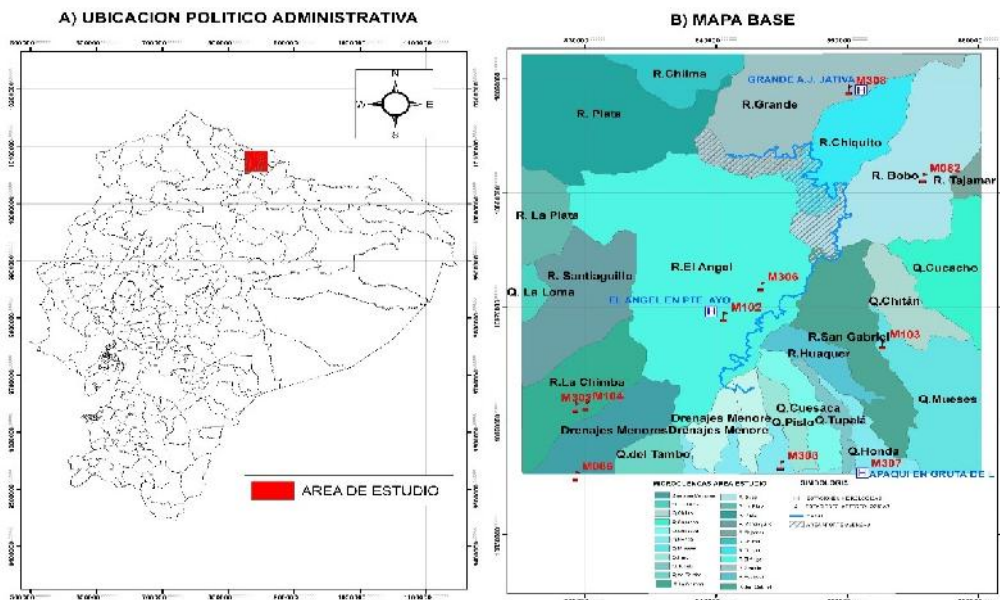


Figura 1. 3. (A) Ubicación política administrativa del área de estudio **(B)** Mapa base con las estaciones meteorológicas e hidrológicas que se evaluarán en el presente estudio

El área de estudio tiene en su parte más alta la presencia del ecosistema páramo, donde predominan condiciones especiales de altas montañas, con áreas sometidas a bruscos cambios de temperatura y húmedas, generalmente cubiertas de niebla o sujetas a constantes precipitaciones y fuertes vientos; pero estos fenómenos alternan con días claros de intensa radiación; las noches son siempre muy frías y en las partes más elevadas (más arriba de 4.300 metros) con nevadas nocturnas muy frecuentes.

El suelo está generalmente saturado de agua; en extensas zonas es pantanoso, formándose turberas; la tierra es negra turbosa, con elevado grado de acidez; este suelo es muy profundo, excepto en las zonas más altas, donde la vegetación es ya escasa entre rocas y arenales; presencia de fuertes pendientes y terrenos de difícil acceso, los límites altitudinales del páramo no son muy precisos, pues varían según la topografía pero empiezan a 3.200 metros, extendiéndose hasta una línea de 4.500-4.700 metros que es el nivel de los neveros permanentes. (Cuatrecasas, 1989)

De acuerdo a la clasificación biogeográfica del mundo en Ecuador podemos encontrar en el área de estudio la siguiente clasificación ya que el piso altitudinal al que pertenece la cuenca del Río Ángel es desde los 3000 metros.

- Subpáramo (3100 a 3400 m), con vegetación dominante de árboles y arbustos (*Diplostegium*, *Hesperoneles*, *Vaccinium* y *Espeletia*) y un estrato de briofitas muy abundantes.
- Páramo propiamente dicho (3500 a 3900 m), con pastizales (*Calamagrostis*, *Agrostis*, *Hypericum*), y elementos de bosque de cañada (*Alchemilla*, *Polylepis*, *Libanotamus* y *Escallaria*).
- Superpáramo (encima de 3900), con vegetación compuesta por *Calamagrostis*, *Agrostis*, *Carex* y otras gramíneas, mezcladas con *Espeletia* y Briofitas".

Pero en Ecuador Cañadas (1993) declaró que la ecoregión de los páramos ecuatorianos es un continuo biológico, que se puede dividir en dos subcontinuos biológicos, el subpáramo desde los 3000 metros de altitud en la cordillera occidental hasta los 3600 metros de altitud y en la

cordillera oriental sobre los 3200 con un límite superior de 3900 metros de altitud, el páramo comienza en los 3600 metros de altura y continua hacia arriba hasta las nieves perpetuas, también realiza una clasificación de las fajas en zonas de vida según Holdridge.

El área de estudio se encuentra ubicada en tres tipos de clima:

- Clima frio de altura desde los 3500 metros.
- Clima de altura que se encuentra desde los 3000 a 3500 metros de altura.
- Mesotérmico semihúmedo bajo los 3000 metros.

El clima se encuentra influenciado por la presencia de la cordillera de los Andes que producen un importante efecto hidrográfico que contribuye a la variabilidad espacial de las precipitaciones además de los principales sistemas regionales que influyen en la variabilidad climática como son: la oscilación decadal del pacífico (Garreaud et al 2008), variabilidad interanual de los Andes en las fases del ENSO (Villacis et al 2003) y la denominada variabilidad estacional en los andes septentrionales denominada ZCIT que ayuda a la presencia del ciclo bimodal de lluvias (Ruiz et al 2009, Poveda et al 2007, Herzog et al 2012).

La variabilidad de las características edafoclimáticas en el área de estudios hace que se presente el ecosistema de frailejones que es un tipo de ecosistema único a nivel mundial el cual es compartido con Colombia en la Cuenca del binacional del Río Carchi, (Mena et al 2006) razón por la cual el estudio de la oferta y demanda de agua para las diferentes actividades antrópicas es valiosa para la planificación y ordenamiento del territorio.

1.5. HIPÓTESIS

El cambio de uso de suelo en una microcuenca de páramo debido a actividades antrópicas, tendrá un impacto significativo en la vulnerabilidad hídrica.

Para evaluar la hipótesis planteada se plantearon los siguientes objetivos.

1.6. OBJETIVOS

La presente investigación puede desarrollarse mediante los siguientes objetivos

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la vulnerabilidad hídrica de la microcuenca del Rio Ángel frente a actividades antrópicas.

1.6.2. OBJETIVO ESPECIFICOS

- Consolidar información correspondiente a suelos, permeabilidad de suelos, uso actual de suelos y escenarios de uso de suelo que permita analizar el balance hídrico de la microcuenca del rio El Ángel.
- Evaluar la vulnerabilidad hidrológica de la microcuenca del rio Ángel frente a escenarios de cambio de uso de suelo.
- Analizar las implicaciones en políticas públicas respecto a evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de la microcuenca del rio Ángel.

1.7. REFERENCIAS

- Aliaga R, Sahuquillo A, Custodio E (2004) Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad [in spanish] (Estimation of hydrogeologic parameters in a low permeability formation). IV Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia, Figueira da Foz, 735-736
- Arnold, J. C. and P. M. Allen (1999). "Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records." *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 411-424.
- Beltrán, K. Salgado, S. Cuesta, f. Yanez, S. Romoleroux, K. Cardenas , A. Velastegui, A. 2009. Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. Ecociencia, Proyecto Paramo Andino y Herbario QCA, Quito.
- Buytaert, W. 2007. Análisis de incertidumbre de la aplicación de modelos hidrológicos en la estimación de la oferta hídrica. *Presentación del taller Investigaciones sobre servicios ambientales en ecosistemas de montaña en los Andes del norte y centro.* Lancaster-Bristol
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. y R. Hofstede. 2006. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos". *Earth-Science Reviews* 79 (2006) 53–72.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. y R. Hofstede. 2006. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos". *Earth-Science Reviews* 79 (2006) 53–72

- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. y R. Hofstede. 2006. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos". *Earth-Science Reviews* 79 (2006) 53–72.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. and Deckers, J., 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8: 108–114.
- Buytaert, W., Sevink, J., Leeuw, B. D. and Deckers, J., 2005b. Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian pramo region. *Geoderma*, In press.
- Chaubey, I., A. S. Cotter, T. A. Costello and T. S. Soerens (2005). "Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty." *Hydrological Processes* 19: 621-628.
- Cuatrecasas, C. 1989. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Rev. Perez. Arbelaezia, Vol. 2 No. 8 – 155 -283 pp.
- Cuatrecasas, C. 1989. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Rev. Perez. Arbelaezia, Vol. 2 No. 8 – 155 -283 pp.
- Dinerstein, E. Olsson, D. Graham, D. Webster, A. Primm, A. Bookbinder, P. Ledec G, 1995. A conservation assessment of the terrestrial ecoregions on Latin American and the Caribbean. Washington DC. The World Bank in association with The World Wildlife Fund 129 p, with separate map at 1:15,000,000.
- ENA. 2000. Estudio Nacional de Agua, Colombia
- Fohrer, N., S. Haverkamp and H.-G. Frede (2005). "Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas." *Hydrological Processes* 19: 659-672.
- Franco, A., F. J. Elorza, F. Bouraoui, G. Bidoglio and L. Galbiati (2003). "Sensitivity analysis of distributed environmental simulation models: understanding the model behaviour in hydrological studies at the catchment scale." *Reliability Engineering & System Safety* 79: 205-218.

- Garreaud, R. Vulle, M. Compagnucci, R. Marengo, J. 2008. Present-day South American Climate. *PALAEO# Special Issue (LOTRED South America)* 281:180-195
- Hattermann, F. F., M. Wattenbach, V. Krysanova and F. Wechsung (2005). "Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis." *Hydrological Processes* 19: 693-714.
- Herzog, S. Martinez, R. Jorgensen, P. Tiessen, 2012. Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales. Instituto Interamericano para la Investigacion del Cambio Global. Sao Jose dos Campor y Comité Cientifico sobre los problemas del medio Ambiente, Paris. 426 pp.
- Heuvelmans, G., J. F. Garcia-Qujano, B. Muys, J. Feyen and P. Coppin (2005). "Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios." *Hydrological Processes* 19: 729-748.
- Hofstede, R, Coppus R, Mena P. Segarra P. Wolf J. Sevink J. 2002 El estado de conservación de los paramos de pajonal en el Ecuador. *Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotrópicos*. 15 (1): 3-18
- Hofstede, R, Lips J, Jongsma W y Sevink J. 1998. Geografía, Ecología y Forestación de la Sierra alta del Ecuador. Ediciones Abya-Yala, Quito.
- Hofstede, R. G. M., 1995. Efects of burning and grazing on a Colombian Páramo ecosystem. Ph.D. thesis, Universiteit van Amsterdam.
- Hofstede, R., Segarra, P, Mena P. 2003. Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Paramos. Global Peatland initiative/ NC-IUCN/ EcoCiencia. Quito.
- IDEAM. ONU. MDGIF.,(2009) Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio climático, Programa conjunto de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático. Junio 2009. 12-28.
- IPCC (1994). "IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations. Part of the IPCC Special Report to the First Session of the Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change, Working Group

II, Intergovernmental Panel on Climate Change [Carter, T.R., M.L. Parry, H. Harasawa, and S. Nishioka (eds.)]. University College London, United Kingdom and Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, 59 pp."

IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC (2007): Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC, Ed. (2001). Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, And Vulnerability, Cambridge University Press

Iroumé, A., A. Huber, C. Salazar and A. Arriagada (1999). Monitoreo y cuantificación de los procesos hidricos en una cuenca andina de la IX región de Chile. Sextas Jornadas Del Comité Chileno Para El Programa Hidrológico Internacional (PHI), Santiago, Chile.

Jayakrishnan, R., R. Srinivasan and J. G. Arnold (2005). "Advances in the application of the SWAT model for water resources management." Hydrological Processes 19: 749-762.

Johnson, R. R. (1998). "An investigation of curve number applicability to watersheds in excess of 25000 hectares (250 km²)." Journal of Environmental Hydrology 6(Paper 7): 10.

León - Yáñez, S. 1993. Estudio ecológico y fitogeográfico de la vegetación del páramo de Guamaní, Pichincha - Napo, Ecuador. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito.

Luteyn, J. L., 1992. Páramos: why study them? In: Balslev, H. and Luteyn, J. L. (eds.), Páramo: an Andean ecosystem under human influence. Academic Press London, pp. 114.

Luteyn, J.L. 1992. Páramos, why study them? Pp. 1-14 en Balslev, H. y J.L. Luteyn (eds). Páramo: an Ecosystem under Human Influence. Academic Press. Londres.

Luteyn, J.L. 1999. Páramos, a checklist of plant diversity geographical distribution and botanical literature. Memoirs of the The New York Botanical Garden vol. 84, The New York Botanical Garden Press, New York.

Maldonado, F. Santos, J. Análisis XII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiana, Brasil 2005, p 601-608

Mayer-Lubke, 1911, Rew = Romanisches Etymologisches Wörterbuch, Von w. Meyer – Lubke. Heidelberg, 1911 -1920

Mena, P. Hofstede, R. 2006. Los páramos Ecuatorianos, Botánica Económica de los Andes Centrales: 91 -109.

Mena, P. Hofstede, R. 2006. Los páramos Ecuatorianos, Botánica Económica de los Andes Centrales: 91 -109.

Mena, P. y H. Balslev. 1986. Comparación entre la vegetación de los páramos y el cinturón Afroalpino. AAU Reports 12.

Mena, P. y H. Balslev. 1986. Comparación entre la vegetación de los páramos y el cinturón Afroalpino. AAU Reports 12.

Mena, P. y H. Balslev. 1986. Comparación entre la vegetación de los páramos y el cinturón Afroalpino. AAU Reports 12.

Mishra, S. K. and V. P. Singh (2004). "Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number." Hydrological Processes 18: 1291-1313.

Moglen, G., E. Beighley and R. Edward (2002). "Spatially explicit hydrologic modeling of land use change." Journal of the American Water Resources Association Feb.

- Montgomery, D. R., W. E. Dietrich, R. Torres, S. P. Anderson, J. T. Heffner and K. Loague (1997). "Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall." *Water Resource Research* 33(1): 91-109.
- Moore, I. D. and G. R. Foster (1990). *Hydraulics and overland flow. Process studies in hillslope hydrology*. Anderson, M. G. Burst, T.P (eds.), Wiley, Chichester.
- Nash, L. L. and P. H. Gleick "The Colorado River Basin and Climatic Change: The Sensitivity of Streamflow and Water Supply to Variations in Temperature and Precipitation, (Washington, D.C.: US Environmental Protection Agency, 1993)."
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000*. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000*. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002^b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000*. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Olivera, F. and D. R. Maidment (1999). "Geographic Information Systems (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing." *Water Resources Research* 35: 1155-1164.
- Olivera, F., J. Famiglietti and K. Asante (2000). "Global-scale flow routing using a source-to-sink algorithm." *Water Resources Research* 36: 2197-2207.
- Parry, M., C. Fischer, M. Livermore, C. Rosenzweig and A. Iglesias (1999). "Climate change and world food security: a new assessment. ." *Global Environmental Change* 9: 51-67.

- Pebesma, E. J., P. Switzer and K. Loague (2005). "Error analysis for the evaluation of model performance: rainfall–runoff event time series data." *Hydrological Processes* 19: 1529-1548.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista académica Colombiana de Ciencias* 28(107): 201-222.
- Poveda, G. Velez, J. Mesa, O. Cuartas, A. Barco, J. Mantilla, R. Mejia, J. Hoyos, C. Ramirez, J. Ceballos, L. Zuluaga, M. Arias, P. Botero, B. Montoya, M. Girado, J. Quevedo, D. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering* 12:4-13.
- Rango, A. and J. Martinec (1995). "Revisiting the degree-day method for snowmelt computations." *Water Resources Bulletin* 31(4): 657–669.
- Ruiz, D, Arroyave, P. Molina, M. Barros, J. Gutierrez, M. Zapata, P. 2009 Signals of climate variability/change in Surface water supply of high-mountain watersheds – case study: Calro river high mountain basin. Los Nevados natural Park, Andean Central Mountain Range, Colombia. World Bank Group. 207 pp.
- Rundel, P. Witter M. 1994. Population dynamics and flowering in a Hawaiian alpine rosette plant. *Argyroxiphium sandwicense*. En: Rundel, PW. Smith AP. Meinzer. 1994 *Tropical alpine environments: Plant Form and Function*. Cambridge U. Press Cambridge
- Rundel, PW. Smith AP. Meinzer. 1994 *Tropical alpine environments: Plant Form and Function*. Cambridge U. Press Cambridge.
- Saavedra, C. and L. Stowhas (2003). Calculo y analisis critico del metodo de la curva número para cuencas del pais. XVI Congreso de Ingenieria Hidráulica, Santiago, Chile.
- Samaniego, L. and A. Bárdossy (2005). "Robust parametric models of runoff characteristics at the mesoscale." *Journal of Hydrology* 303: 136-151.

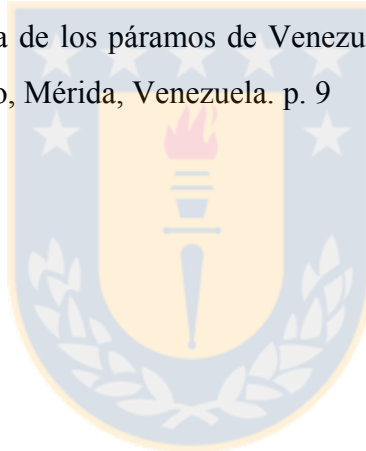
Schimel, D., J. M. Melillo, H. Tian, A. D. McGuire, D. W. Kicklighter, T. Kittel, N. Rosenbloom, S. Running, P. Thornton, D. Ojima, W. Parton, R. Kelly, M. Sykes, R. Neilson and B. Rizzo (2000). "Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States." *Science* 287: 2004-2006.

USDA, United States Department of Agriculture (1986) Urban hydrology for small watersheds. Technical release 55, Washington DC

USSCS, U. S. Soil Conservation Service (1964) Hydrology. In: SCS National Engineering Handbook, Section 4, Washington DC

Van Griensven, A. and W. Bauwens (2005). "Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin." *Hydrological Processes* 19: 827-838.

Volkmar Vareschi. 1970, Flora de los páramos de Venezuela, Universidad de Los Andes, Ediciones del Rectorado, Mérida, Venezuela. p. 9



2. CAPITULO 2: SOIL PERMEABILITY STUDY APPLIED TO THE GENERATION OF MAPPING IN TWO CANTONS OF LOJA PROVINCE, ECUADOR.

Jorge Espinosa Marín* ^(a) Diego Rivera ^(a) José Luis Arumí ^(a) Hamil Uribe ^(b)
jorgeespinosa@udel.cl, dirivera@udec.cl, jarumi@udec.cl, huribe@inia.cl

a) Universidad de Concepción, (b) Instituto de Investigaciones Agropecuarias Chile

2.1. SUMMARY.

The generation of permeability maps using minidisk infiltrometers is based on the analysis and interpretation of geology, environmental morphology, land use and slope, which enables the selection of sampling areas with similar characteristics of slope, soil texture, geological units, and land use. This paper focuses first on building a map of five geopedologic parameters in two cantons of Loja Province in Ecuador. The method represents the integration of the physical characteristics of the study area and then determines the infiltration capacity differences in the most representative geopedologic units. This requires the integration of the databases of the above variables, which is performed using tools of Geographic Information Systems (GIS).

In determining the basic data, minidisk infiltrometers were used to perform seventy-two infiltration tests in different types of soils with varying organic matter content, texture, soil structure and vegetation cover, and which showed the spatial variability that exists in this study area. In addition, it was observed that the infiltration rate depended mainly on the content of the organic matter in the soil and is consistent with information collected on permeability worldwide.

In this study, was generated pedotransfer function (FTP) coefficient of determination R^2 0.78, the determination of the coefficient indicates a satisfactory estimate of the permeability with the variables that were analyzed; in addition, the methodology for assessing the permabilidad was suitable for the conditions of this investigation. For this reason, the method described here should be tested in other areas of the country with a greater number of field trials and in areas with more variable contents of organic matter and soil textural classes.

KEY WORDS: Infiltration, Pedotransfer, GIS, Soil Mapping, Soil Physical Properties, Soil Variability.

2.2.INTRODUCTION

Infiltration is a complex, highly variable process that directly depends on the physico - chemical characteristics of soil (Espinosa et al., 2011; Byers & Stephens, 1983; Bosch & West, 1998; Shukla et al., 2003; Monsalve, 2006; Kirkham, 2005; Lal and Taylor, 1970; Lal et al., 1989). Its variability is related to differences in soil texture, slope, climate, vegetation, and farming practices (Salton & Mielniczuck, 1995; Guatibonza et al., 2009.). Infiltration has a fundamental role in the transport processes of water and contaminants, such as groundwater recharge and pollutant transport. Therefore, improving knowledge of the dynamics of water movement and solute flow in the soil allows better water management at both the farm and watershed scale (Hincapie et al., 2012; Varni et al., 2005).

Infiltration refers to the maximum water entering into the soil profile. It differs from the percolation process because the latter is the downward movement of water from or through the unsaturated zone (Monsalve, 2006). **The initial infiltration rate** depends on the

antecedent moisture content of the soil before the introduction of water. When the infiltration rate reaches a plateau, it is equivalent to the saturated hydraulic conductivity. Thus, the **hydraulic conductivity** represents the degree of ease with which water passes through soil (Babalola, 1978; Ankeny, 1992). On the other hand, permeability is the infiltration rate per unit gradient of hydraulic head. Hence, infiltration rate, hydraulic conductivity, and permeability are closely related concepts, but permeability depends on the boundary conditions and mainly on the size and distribution of soil grains and the antecedent soil water content (Monsalve, 2006; Guatibonza et al., 2009).

The proper knowledge of these parameters – both temporally and spatially – allows the planning and designing of water systems. For instance, a correct estimation of infiltration rates allows the design of irrigation systems that apply the right amount of water, thus, avoiding agronomic issues, saving energy and avoiding erosion problems (Oliveras et al., 2013).

The infiltration process can be described quantitatively by solving the complete transport equation (Richards, 1931) or by considering a relationship between cumulative infiltration and time, expressed in terms of parameters with a physical or empirical base (Haverkamp et al., 1990). Several field instruments exist to estimate the infiltration rate (Reynolds, 1993; Angulo Jaramillo et al., 2000), but the disc infiltrometer is the main tool that helps in gathering information in the field and results in a considerable cost reduction (Sivapalan, et al., 1986).

Most field instruments give information about the conductivity or infiltration rates referred to the point level. Consequently, it becomes difficult to determine the spatial variation of these parameters. Moreover, the variability of an area is influenced by factors such as vegetation cover, the presence of macropores or systems of cracks on a small scale. This has special influence on the determination of soil permeability, the infiltration rate per unit of land and its spatial variability (Willis et al., 2011).

In Ecuador, there is no methodology to incorporate the criteria of soil texture, vegetation coverage, slope, and geomorphology, among others, into the permeability measure of the soil. The method commonly used is the infiltrometer cylinder, which requires large amounts of water and this hampers their use in slope conditions and difficult-to-access sampling points; thus, a low-cost method for quickly gathering information with little water consumption is a priority for use in the topographical conditions where this study was conducted.

Given the importance of permeability in the management of natural resources - especially land change- the main goal of this study is to analyze the variability of soil permeability within Loja Province using field infiltration tests. The specific objectives were (1) to analyze the influence of the bulk density, the soil organic matter, the permanent wilting point, and the field capacity on the spatial variation of the soil permeability, (2) to estimate the unsaturated hydraulic conductivity at sampling points based on infiltration rate data (3) to estimate the unsaturated hydraulic conductivity at sampling points based on pedotransfer functions in areas with similar geological, and morphological characteristics, and (4) to generate thematic maps of soil permeability.

The scope of this study is to establish a methodology for obtaining basic information that assists in the generation of soil permeability maps as an effective tool for territorial planning and irrigation system design (Meijerink, 1988; Zinck 1988).

2.3.MATERIALS & METHODS

2.3.1. Thematic mapping

Thematic mapping is a technique that generates information on landforms, geomorphic processes, structure, composition and dynamics of soil and water, as well as information about soil, climate, slope, geomorphology, and land use (Allende & Mendoza, 2007; Meijerink, 1988; Zinck, 1988). Our approach integrates knowledge and data of morphology, geology and slope to identify areas of similar characteristics, with soils that are suitable for irrigation and susceptible to erosion (Zinc, 1988; Farshad et al., 2005; Allende et al., 2007).

2.3.2. Selection and definition of variables.

For infiltration mapping, the following layers were used (Clirsen, 2010. Scale 1:50000): geology, morphology and slope. To our knowledge, no systematic empirical research exists in Ecuador relating to the interactions between landscape morphology, the characteristics of rainfall, land use, surface properties and their relation to water flow in soil. Additionally, the spatial variability of the land use is typically not integrated into the study because the area analyzed is an agricultural zone with a high rotation of crops.

Geological Units (Figure 2.1) define landforms that share composition and structure (Winckell, 1991). The presence of Quaternary deposits and water infiltration increases the surface impact generated by the phenomena of washing and erosion; depending on the

mobility of water transport in the territory, these phenomena can favor chemical weathering processes, increase vegetation activity or set a constant dynamic of erosion that can change the appearance of the terrain (Vidal, 1987).

Morphological Units (Figure 2.1B) detail landforms by describing soil horizons in terms of shape, composition, structure, organization, and color. These unique units refer to homogenous areas (Gonzales, 1973; Winckell, 1991).

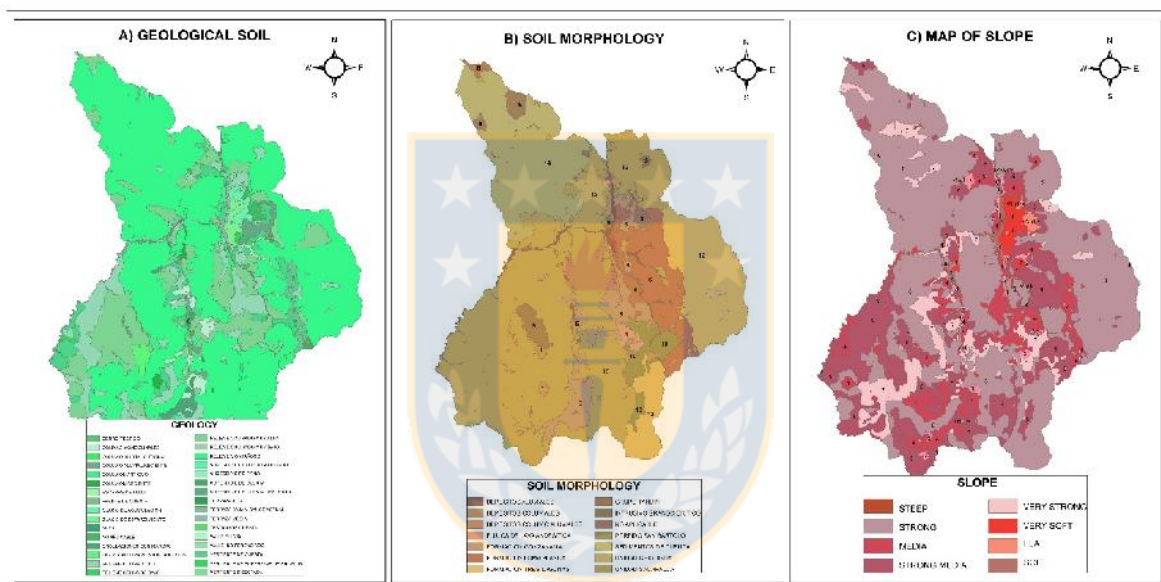


Figure 2. 1. A) Categorization of geology in the study area. B) Categorization of morphology in the study area C) Categorization slope

Slope (Figure 2.1C) refers to the steepness with respect to the horizontal expressed as a percentage. This factor influences the movement of surface water, determining the effective contact time between water and soil. The classification of this parameter is important to determine land use, the magnitude of infiltration, and the surface and subsurface runoff (Philip, 1991; Miyazaki, 1993; Gavin and Xue, 2007; Hincapie et al., 2012). Despite its importance, there is little information regarding the effect of slope on water dynamics and

soil hydraulic properties, and this information is even scarcer for Andisols (Hincapie et al., 2012).

2.3.3. Study Area

The study area is located in the southern part of Ecuador (Figure 2A), Loja Province. The height ranges from 800 to 1700 meters above sea level, with an area of 76000 hectares. The average rainfall is in the range of 250 - 1750 mm/yr (Figure 2B), the average temperature range is 11-23 degrees Celsius (Figure 2.2C). The soil and weather conditions favor livestock and agricultural production, which are 80 % and 15 % of the total production in the province respectively (INEC, 2000)., The agriculture sector uses low-tech systems, and the main crops are sugar cane, tomatoes, peppers, and corn. There is no planning of natural resources in the province for production purposes.

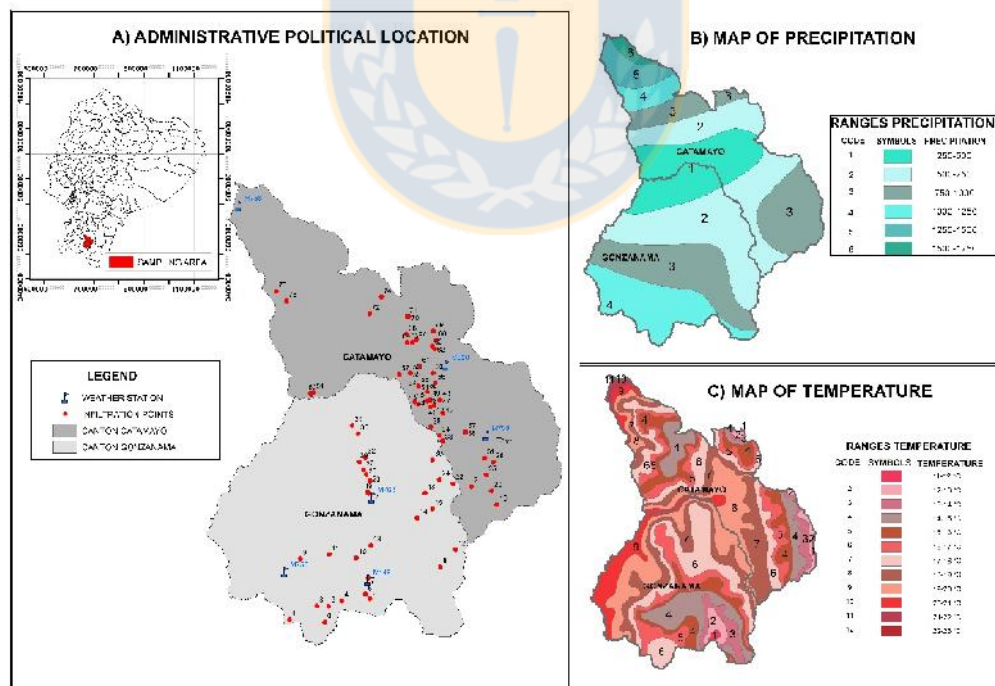


Figure 2. 2. A) Administrative policy location of the study area in the Ecuadorian territory with geographical location of the sampling points with methodology. B) Rainfall map C) Temperature map

2.3.4. Collection of information and field work

The process of identifying sampling sites was performed by characterizing known environmental units as homogeneous units. The identified areas provide relevant information in the study area because they integrate the information of morphology, geomorphology and slope to locate spatial units of interest. The information generated about permeability is added through pedotransfer functions to be evaluated in response to the proposed classification of permeability (table 1), with the specific goal of generating the theme map. At the same time, the permeability of the soils provides the basis for territorial planning of the irrigation areas in terms of land use and exploitation.

We collected infiltration information by using a minidisc portable tension infiltrometer (Decagon Devices, 2007). The minidisk allows the quantitative identification of the relative contribution of the key hydrodynamic parameters that depend on the flow of infiltrated water and pressure during the water application, which is the unsaturated hydraulic conductivity (Wilson et al., 1988; Smettem et al., 1995; Angulo et al., 2000, Aoki, 2010). The infiltrometer is fixed to the ground with a ring to create tension between the soil and the water in the tank so that measurements can be performed based on the time elapsed to infiltrate all water contained in the tank (Martínez, 1996). The potential is controlled by a cylinder bubbler connected to the reservoir (Sinoga, 2003).

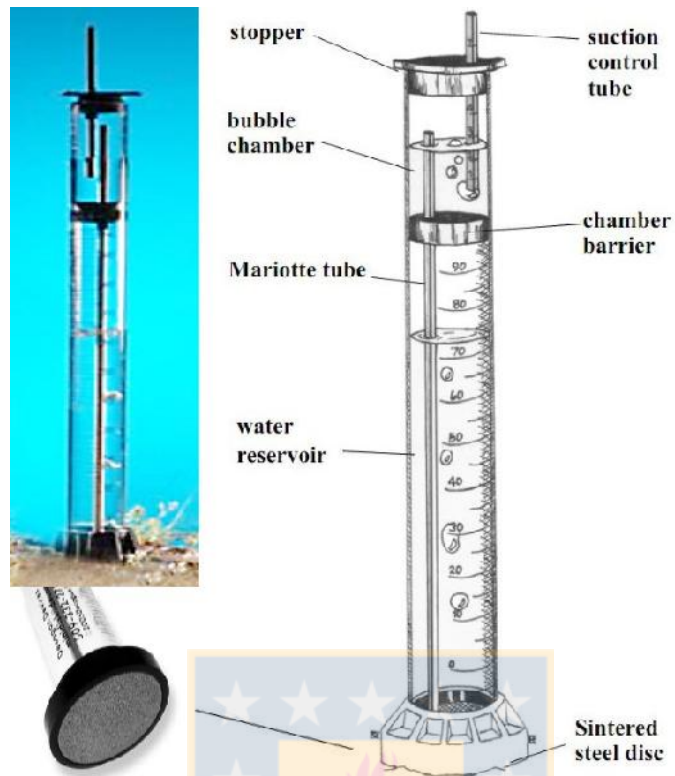


Figura 2. 3. A) Infiltrometer Diagram.

The device (Figure 3.3A) has a unique independent tower of 31 mm of internal diameter that controls and balances the load of negative pressure in the disc; the disc having contact with the ground has 45 mm of internal diameter with a thickness of 3 mm.

The main advantages of use of the infiltrometer (Sinoga, 2003) are that (1) it allows a large number of measurements in less time because it reaches the stable rate of infiltration faster; (2) it has easy-to-use instrumentation; (3) there is no need to calibrate the tension, the method accepts the textural parameters of the Van Genuchten floor; thus, it is necessary to have previously analyzed the texture and set it to the 12 classes (Genuchten, 1980); (4) the infiltrometers can be easily transported due to their small size and low water requirements; and (5) they do not need much smooth surface in the field because the diameter of the cylinder

is small. This is a very important advantage on hillsides or where the slope is high, approximately 20%. Fieldwork using the minidsc has been successfully carried out by Simetteem et al., (1995), Zhang et al., (1999), Bagarello et al., (2010), Aoki et al., (2010).

The 77 sampling points were georeferenced by GPS measurements (Juno 5B, Trimble. Precision 2 m). Samples were taken from different sites to capture the variability of the slope, geology, morphology, and soil coverage. The extent of the area, the ease of access and the spatial density influenced the sample number. Additionally, we sampled soil at a 30 cm depth using a Kopecky cylinder to determine gravimetric moisture, porosity, void ratio and bulk density (Uhland 1949, Guatibonza et al., 2009). The textural class was based on the Bouyoucos method (Bouyoucos, 1927 Guatibonza et al., 2009) and organic matter was determined by the Walkley and Black method (Walkley 1934, Nelson et al., 1996).

The methodology used for this study was chosen to define the effects of water in the soil; the data obtained on the permeability were subsequently evaluated with the model proposed by Zhang in 1997. (Sinoga, 2003). The resulting values were reclassified to a scale applied in land use capacity for agriculture irrigation (Cisneros, 2003), which allowed information to be simplified to known ranges.

To estimate hydraulic properties, such as hydraulic conductivity and water holding capacity, we used pedotransfer functions in the points where sampling for information about permeability could not be made; at these points, the hydraulic conductivity was not saturated by integrating the textural class (Saxton & Rawls, 2005, Rawls & Brakensiek, 1985; Vereecken et al., 1989; Zimmermann & Basile, 2006; Zimmermann & Basile 2007; Rawls

et al., 1992; Williams et al., 1992). Although these functions cannot replace direct measurements of some soil properties, they can improve the prediction of field data in areas that are difficult to access, i.e., to extend from the pedón level to broader map units (Casanova et al., 2003), whereby it was possible to predict the values of permeability to areas where no measurements are taken in situ.

2.3.5. Analysis of patterns

Differences in the infiltration data can be explained by the fact that Zhang's method applied to infiltration values and different textural parameters from Genuchten. To find similar textural characteristics, the conductivity values must be similar, so the method exerts direct influence on the hydrodynamic behavior of the soil; in addition, other physical factors influence this methodology (Sinoga et al., 2010) to evaluate pedotransfer functions. Therefore, the data obtained from the infiltration tests results are the associated texture (% clay, % sand, % silt) and organic matter of the physical analysis for each soil sampling point because the data have similar values and the soils tend to have conductivity (Reynolds et al., 2002).

2.4.RESULTS AND DISCUSSION

According to the pedotransfer function (1) for permeability with a goodness of fit $R^2 = 0.78$, permeability values could be estimated for the different areas where permeability information cannot be obtained. The percentage of organic matter constitutes the most significant independent variable ($p < 0.05$), which is consistent with several studies mentioning the effects of organic matter on the behavior of hydraulic conductivity. These studies concluded that there is an intimate relationship between this parameter and increased permeability Buczko et al. (2006). These findings are confirmed by Edge et al. (2004) who found that soils

with low organic matter content (<2.3%) had a decrease in basic infiltration rate, likewise a significant increase in infiltration rate for soils with high contents of organic matter. Seguel et al. (2003).

$$Perm = -89.988 + 0.378 (\%clay) + 0.133 (\%sand) + 0.2657 (\%silt) + 11.893 (\%M.O) \quad (2-1)$$

** Perm: Soil Permeability. M.O: Organic matter.

The locations of the field tests are shown in Figure 2A, while Figure 4 shows the map with the reclassified data according to Table 1. The values of the magnitude of the soil parameters are similar to Aoki (2010) and White and Sully (1987), who worked with pressure 1 cm in a loam soil, obtaining values of hydraulic conductivity (Ko) of 12.6 m/ h). Smettem et al. (1994), estimated a Ko of 56 mm/h using a sandy loam soil, with a water application pressure of 2 cm.

Following the classification rules (Cisneros, 2001), areas with permeability values above 180 mm/h (fast drainage, low water holding capacity) or below 3.6 mm/h (low drainage capacity) are not suitable for irrigation systems (8.3%, 11065 ha). Figure 4 shows that the study areas of Class 4 (moderate) and Class 5 (moderately slow) soils predominate. Both classes present the potential for irrigation, with an organic matter content in the range of 2 - 6% and textures of loam clay, silty and clay, loam silt clay; these classes present good opportunities for irrigation. The infiltration rate is mainly affected by the amount of organic matter as it shows strong spatial correlation (Rawls et al., 1992; Williams et al., 1992).

Tabla 2. 1. Permeability rating methodology (Cisneros, 2001)

CLASS	DESIGNATION	RANK (mm/h)
1	VERY FAST	>250
2	FAST	150 -250
3	MODERATELY FAST	65-150
4	MODERATE	20-65
5	MODERATELY SLOW	5 - 20
6	SLOW	1,5 - 5
7	VERY SLOW	<1,5

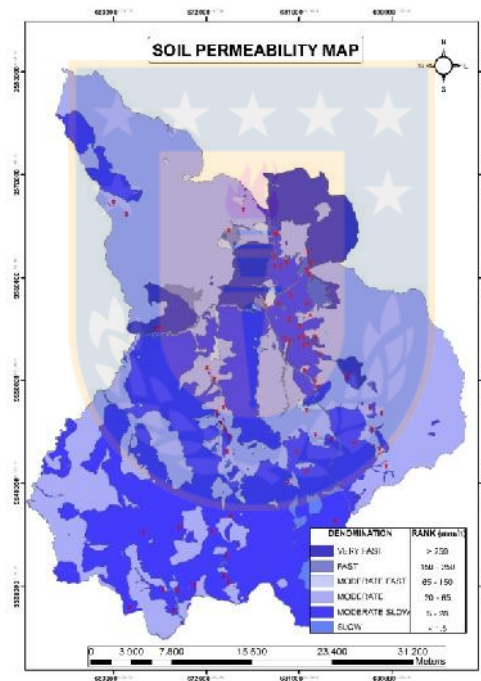


Figura 2. 4. Permeability map of the study area

From the methodological point of view we note that the method can obtain satisfactory and adjusted results to other methods, moreover easy handling and speed of obtaining reliable data given the small area of hydraulic contact with soil, united to the ability to reproduce in

situ various experiments and intensify sampling areas are favorable circumstances for the implementation of this methodology (Sinoga et al., 2003).

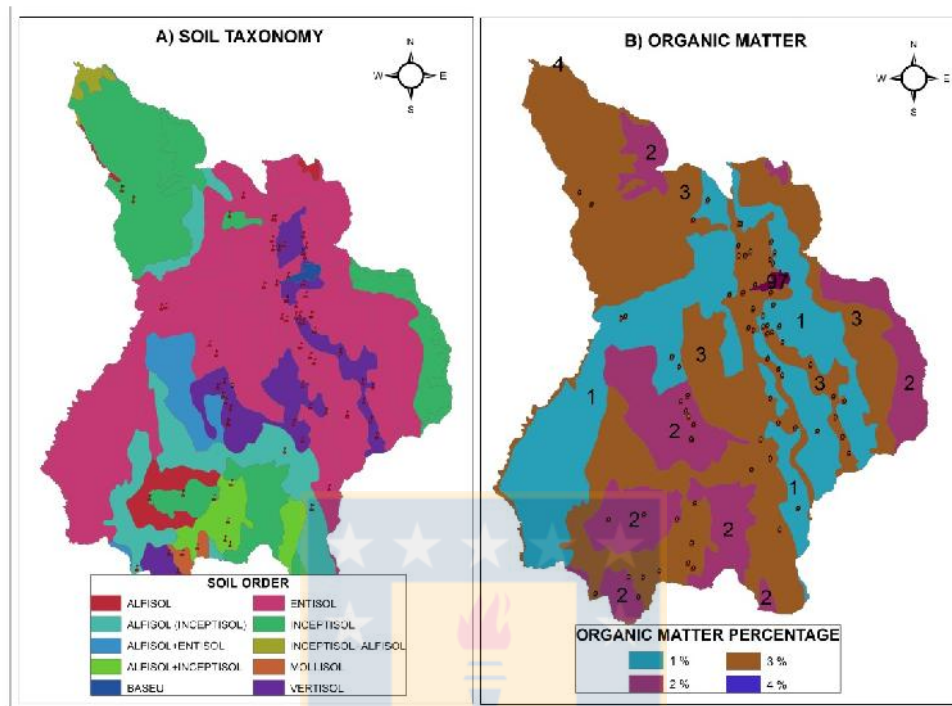


Figura 2. 5. A) Map Soil taxonomy B) Map Organic matter

Note also that the results obtained in this paper with the application of the pedotransfer function methodology improve the prognosis of the soil hydraulic parameters, which is mainly due to the inclusion of additional variables, such as organic matter (figure 5B), bulk density, particle size composition (Zimmermann & Basile, 2008).

2.5.CONCLUSIONS

The concept of environmental units allowed the integration of sectorial reporting of climate, geology, slope, geomorphology, and vegetation to detect areas homogeneous both in their physical characteristics and behavior with internal consistency.

The integrative use of fieldwork and pedotransfer functions provides a “smoother reality” (Dafonte, 2001), and it allows the definition or extraction of relevant information for soil use and management.

The multiple linear regression equations acceptably estimated the permeability values from a minimum of information available from the soil mapping.

The generated permeability map and the proposed methodology provide a clear conception of system variability in the structure of soil properties. It was possible to demonstrate the usefulness of incorporating environmental physical heterogeneity into the theoretical models referenced by graphical representation, which also served to analyze the uncertainty of the obtained results by simulation (Comegna and Vitale, 1993).

2.6. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was made possible by the Consultant Company. Agroprecisión. Ltd., within the framework of the Geoinformation for Land Management National Level Project, Scale 1:25000, I want to give special recognition to the University of Concepción in Chile for all their support.

2.7. REFERENCES

- Allende, T., Mendoza, M. 2007. Análisis Hidrometeorológico de las estaciones de la Cuenca del lago de Cuitzeo, *Investigaciones Geográficas*, 63, 56-76.
- Angulo, R., Vandervaere, J., Roulier, S., Thony, L., Gaudet, J., & M. Vauclin, 2000. field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, 55, 1-29.
- Ankeny, D., 1992. Methods and theory for unconfined infiltration measurements. In: *Advances in measurement of soil Physical properties: Soil Science Society of America*. 123-141.
- Ankeny. D., Ahmed. M., Kaspar. C., & Horton R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity; *Soil Science Society of America Journal*, 55 (2), 460-470.
- Ankeny. D., Kaspar. C., & Horton. R. 1988. Design for an automated tension infiltrometer; *Soil Science Society of America Journal*, 52, 89– 896.
- Aoki. M., & Sereno. R. 2005. Comparación de Metodologías de Cálculo de Propiedades Hidráulicas de un Suelo a Partir de Datos Medidos con Infiltrómetro de Disco. *Agric. Téc*, 65, 2-10.
- Babalola. O. 1978. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. *Soil Science*, 126 (5), 269–279.
- Bosch. D, & West. L. 1998. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 90-98.
- Bosch. D., 1991. Error associated with point observations of matric potential in heterogeneous soil profiles, 34, 2427-2436.
- Bouyoucus. J., 1927. The hydrometer as new method for the mechanical analyses of soil. *Soil Sci*, 23, 343 -352
- Brakensiek. L., & Rawls. J. 1989. Infiltration research needs in watershed hydrology. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng*, 26, 1753 - 1757
- Bristow. K. & Savage .M. 1987. Estimation of parameters for the Philip two - terms infiltration equation applied to field soil experiments. *Australian Journal of Soil Research*, 25, 369-375.

- Buczko, U., Bens, O. & Huttel, R. F. 2006. Tillage effects on hydraulics properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* (70)1998-2007
- Bujang. B.K., Faisal H.J., & Low. T.H. 2006. Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(5), 1293-1306.
- Byers. E. & Stephens. B. 1983. Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 1072-1080.
- Carlón. T. & Mendoza. M. 2007. Cartografía geopedológica aplicada al cálculo de infiltración, *Ciencia Nicolaita*, 47, 103 -118.
- Casanova. M., Seguel. O., & Joel A. 2003. Funciones de pedotransferencia para conductividad hidráulica en laderas de secano. *R.C. Suelo Nutr. Veg*, 3, (2), 42-48.
- Cisneros. R., 2003. Apuntes de la Materia de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma San Luis de Potosí. Centro de Investigación, Estudios de Posgrado y Area Geodésica.
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Geomorfología, Hoja de Catamayo , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Geomorfología hoja de Gonzanamá , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Pendientes, Hoja de Catamayo , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Pendientes hoja de Gonzanamá , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Geomorfología, Hoja de Catamayo , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Geomorfología hoja de Gonzanamá , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Morfología, Hoja de Catamayo , Quito. Ecuador
- Clirsen. Instituto Geográfico Militar. 2010. Mapa escala 1:250000, Carta de Morfología hoja de Gonzanamá , Quito. Ecuador.

- Coelho A. (1974). Spatial variability of water related soil physical properties; Ph.D. thesis, University of Arizona, Tucson Arizona, USA
- Comegna. V., & Vitale. C. 1993. Space-time analysis of water status in a volcanic Vesuvian soil. *Geoderma*. 60, 135-158.
- Dafonte.J., Gonzales. P., Taboada. C., Rosa. S. 2001. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con el permeámetro de Guelph, 1, 61-67.
- DiCarlo. D.A., Bauters. T.W., Darnault. C.J., Steenhuis. T.S., & Parlange. J.Y. 1999. Lateral expansion of preferential flow paths in sands. *Water Resources Research*, 35(2), 427-434.
- Dooge. I. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Dept. Agricultura. Agricultura Research Service, U.S.DA. Technical Bulletin N51468.
- Espinosa. J., Hamil, U., Arumí, J., Rivera, D., & Stehr. A. 2011. Evaluación de la vulnerabilidad climática de la cuenca del río Limarí usando un modelo semidistribuido SWAT. *Gestión Ambiental*, 22, 13-30.
- Fietz. C., Folegatti. M., Vieira. S., & Frizzone. J. 1999. Efeito da variabilidade do armazenamento de agua no solo na qualidade da irrigação por aspersão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb*, 3(2), 150-153.
- Gavin. K., & Xue. J., 2007. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes. *Computers and Geotechnics*, 35(4), 223-230.
- González, F. (1973). Estudio ecológico de la sub-región de Madrid. *COPLACO, Madrid*.
- Green. W. & Ampt. G. 1911. Studies of soil physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4, 1-24.
- Guatibonza. M., Álvarez. H., Javier. G., & Sanabria. J. 2009. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tunguavita. Universidad Nacional de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 27, 261-271.
- Guatibonza. M., Álvarez. J., Sanabria. J., 2009. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tunguavita, 27 (2), 261-271

- Gupta. R., Rudra. P., Dickinson. T., Patni. K., & Wall. J. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. Transactions of the ASAE, 36(1), 5155.
- Gurvich. A. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego, San José, Costa Rica: IICA, p. 145.
- Gwenzi. W., Hinz. C., Holmes K., Phillips. I., & Mullins. J., Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem, Geoderma, 166, 43-56
- Haverkamp. R., & Parlange. J., 1990. Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. Soil Science, 149(5), 292-300.
- Hewlett. J.D., & Hibbert. A.R. 1963. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage. Journal of Geophysical Research, 68(4), 1081-1087.
- Hincapié. G., & Caonrado. T., 2012. Dinámica del agua en Andisoles bajo condición de ladera. Rev. Fac. Nal. Agr, 65(2), 6765 - 6777
- Holtan. N. 1961. A concept of infiltration estimates in watershed engineering. Dept. Agriculture, Agriculture Research Service. ARS, 41-51,
- Horton. E. 1939. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. Transactions of American Geophysical Union. 693-711.
- Horton. R. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Journal, 5, 399-417.
- INEC. (2000). Censo Nacional Agropecuario, Ecuador.
- Joaquim. G., Cichota. R., Condini. F., & Van Lier. Q. 2002. Padrões de variabilidade espacial para densidade e umidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo álico. (CD) En: Reunião Brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 14, Cuiabá, Brasil.
- Kirkham. M. 2005. Principles of Soil and Plant Water Relations. Elsevier Academic Press: Burlington, 7, 145-172.
- Knighton. M. 1978. Estimating infiltration rates for a loessal silt loam using soil properties, North Central Forest Experiment Station, Forest Service NC, 233, 4.
- Kostiakov. A. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Soil Science Congress, 6, 17-21.

- Lado, M; A Paz & M Ben-Hur. 2004. Organic Matter and Aggregate Size Interactions in Infiltration, Seal Formation, and Soil Loss. *Soil Sci Soc Am J.* (68) 935-942.
- Lal. R., Logon, T.J., Fausey. N.R., 1989. Long term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained mollic ocharqualf in North West Ohio. 2. Infiltrability, surface runoff, subsoil flow and sediment transport. *Soil Till. Res.*, 14, 359–373.
- Lal. R., Taylor. G.S., 1970. Drainage and nutrients effects in a field lysimeter study. II Mineral uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 245–248.
- Mallants. D., Mohanty. B., Vervoort. A., & Feyen. J. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Sol Technology*, 10, 115-131.
- Matínez. J. (1996). Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. Universidad de Murcia.
- Meijerink. A. 1988. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal. ITC Publication*, 7, 22-44
- Miyazaki. T. (1993). *Water flow in soils*. Marcel Dekker, New York.
- Mohanty. B., Kanvar. R., & C. Everts. 1994., Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 672-677.
- Monsalve. G. 2006. Hidrología en la ingeniería, Escuela Colombiana de Ingeniería, Quinta reimpresión, 133-150.
- Moustafa. M. 1999 A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large – scale subsurface drainage desing in Egypt. *Agr. Water Mgt*, 42(2000), 291-312.
- Moustafa. M., & A. Yomota. 1998. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties. *Agr. Water Mgt*, 37(1), 1-19.
- Nelson. D., & Sommers E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis*, Ed. Agronomy. 9, 961-1010.
- Olivera. N., Masjuan. Y., Fabre. T. 2013. Evaluación de la calidad del riego de la máquina con enrollador modelo IRROMOTOR, *Rev. Cie. Téc. Agr.*, 22, 39-44
- Perrot. 1982. *Handy data for the sprinkling expert*. 530 pp.
- Philip. J.R. 1991. Infiltration and downslope unsaturated flows in concave and convex topographies. *Water Resources Research*, 27(6): 1041-1048.

- Pineda. C., & Vilorio. J. 1997. funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de valencia. *Venesuelos*, 42 ,5-2.
- Rawls. W.J., & Brakensiek. D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p 293-299. In Jones. E.B., & Ward. T.J., (ed.) *Watershed management in the eighties*. Proc. Irrig. Drain. div., ASCE, Denver, CO. April 30 - May 1. 1985.
- Rawls. W.J., Ahuja. L.R., & D.L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. 329-340. In M. Th. van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L.J. Lund (ed.). *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. Proc. Int Worksh. Riverside, CA.. University of California, Riverside, CA.
- Reynolds. W.D., Elrick, D.E., Young, E.G., Amoozegar, A., Booltink, H.W.G., Bouma, J., 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: Dane, J.H., Topp, G.C.(Eds.), *MethodsofSoilAnalysis,Part4,PhysicalMethods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, pp. 797–878.
- Richards. A. 1931. Capillary conduction of liquids through Poros Mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Ritsema. C.J., Oostindie. K.. & Stolte. J. 1996. Evaluation of vertical and lateral flow through agricultural loessial hillslopes using a two-dimensional computer simulation model. *Hydrological Processes*, 10(8), 1091-1105.
- Romano. N. 1993. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. *Geoderma*, 60, 169-186.
- Salton. C., & Mielniczuck J.1995. Relaciones entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19, 313-319.
- Sepaskhah. A., & Rezaee. A. 1998. Hydraulic conductivity measurement for subsurface drainage system. *Iran Agr. Res*, 7, 139-150.
- Shukla. M.K., Lal. R., & Ebinger. M. Tillage effects on physical and hydrological properties of a typic argiaquoll in Central Ohio *Soil Sci.*, 168 (2003), 802–811
- Sinoga. J., Romero. A., Quiñonero. J., & López. M. 2010. Aplicación de técnicas SIG en el estudio de evaluación de degradación de suelos. *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. 1.074-1.089.

- Sinoga. J., Santamaría. L., Lopera. A., Noguera. J., Gallegos. A., Marquez. J., Carrero. J., & Martínez. J. 2003. Determinación de la conductividad hidráulica en laderas mediante el uso de infiltrómetros de minidisco a lo largo de un gradiente pluviométrico mediterráneo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, VI.
- Sivapalan. M., & Wood. E., 1986. Spatial heterogeneity and scale in the infiltration response at catchments. *Water Science and Technology Library* Volume, 6, 81-106
- Smettem, K.R.J., Ross, P.J., Haverkamp, R., Parlange, J.Y., 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from disk infiltrometer. 3. Parameter estimation using double-disk tension infiltrometer. *Water Resour. Res.* 31, 2491–2495.
- Sousa. J., Queiroz J., & Gheyi. H. 1999. Variabilidad espacial de características físico-hídricas e de agua disponible en un solo aluvial no semi-árido paraibano. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Amb*, 3(2), 140-144.
- Stein. M. 1999. *Interpolation of Spatial Data, Some theory for Kriging*, Springer series Statistics. 257.
- Uhlund. R.E. 1949. Physical properties of soils as modified by crops and management. *Soil Science Society of America Proceedings*, 14, 361-366.
- Valenzuela. P., Melendez. M., Dominguez. M., Sanchez. M., & Santa Maria. J. 2013. Dolinas del colapso en el Valle de Alcedo (León); ¿un impacto geomorfológico/ambiental inducido por los túneles de pajares? *Estudio Preliminar. Geogaceta*, 54, 139-142.
- Van Genuchten. M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Varni. M., Gandini. M., Estraiagas. I., & Vázquez. P. 2005. Propuesta y comparación de metodologías para la determinación y mapeo de áreas anegadas mediante el uso de imágenes Landsat. *Actas del XX Congreso Nacional del Agua CONAGUA (en formato CD)*, Mendoza ISBN 987-22143-0-1, 15
- Vereecken. H., Maes. J., Feyen. J., & P. Darius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.*, 148, 389-403.
- Vidal. J. 1987 Aportación de la Geomorfología aplicada a la ordenación del territorio y el medio Ambiente en el Occidente Andaluz, *Revista de Estudios Andaluces.*, 9, 41-54.

- Vieira. S., De Maria. I., Lombarda. F., Dechen. S. & O. Castro. 1992. Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas. Instituto Agronômico, Campinas, Brasil. Documentos IAC, 29, 41-51.
- Walkley. A. & Black. I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.*, 63, 251-263.
- Walkley. A. 1947. A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63:251-263.
- Wenzi. W., Hinz, C., Holmes. K., Phillips. R., & Mullins. 2011. Field-scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on recently constructed artificial ecosystem. *Geoderma*, 166, 43-56.
- Williams. R.D., Ahuja. L.R., & Naney. J.W. 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density, and limited data. *Soil Sci.*, 153, 172-184.
- Wilson. G.V., & Luxmoore, R.J. 1988. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 329-335.
- Winckell A. (1997). Los Paisajes naturales del Ecuador, Geografía Básica del Ecuador, IPGH-IGMORSTOM, T.IV, vol. 1. Quito
- Winckell A. (2000). Los Paisajes naturales del Ecuador, Geografía Básica del Ecuador, Quito: IPGH-IGMORSTOM, T.IV, vol. 2. Quito
- Winckell. A., Zebrowski. C., & Delaune. M. 1991. Evolution de modele quaternaire et des formations superficielles dans les Andes del'Equateur. *Geodynamique*, 6, 97-117.
- Zhang. R., 1997. Infiltration models for the disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1597-1603.
- Zhang. Y., Smith. R.E., Butters. G.L., & Cardon. G.E., 1999. Analysis and testing of a concentric-disk tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 544-553.
- Zimmermann. E, & Basile. P. 2006. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones con propiedades físicas y granulométricas. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Ciudad Guayana. Venezuela.
- Zimmermann. E. 2006. Estimación de funciones hidráulicas de suelos limosos. Valores de referencia y regresiones con parámetros físicos. Cuadernos del CURIHAM, UNR Editora. Rosario, 11(1), 49-66.

Zimmermann. E., & Basile. P. 2007. Funciones hidráulicas de suelos limosos: regresiones no lineales con propiedades físicas y granulométricas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán. Argentina.

Zimmermann. E., & Basile. P., 2008. Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos Llanura Argentina. Boletín Geológico y Minero, 119 (1), 71-80

Zinck. J. 1988. Physiography & soil. ITC lecture Notes SOL 41, Enschede, The Netherlands.



3. CAPITULO 3: VULNERABILITY OF WATER RESOURCES AT THE ECUADORIAN PÁRAMO TO LAND USE CHANGES

Jorge Espinosa Marín ⁽¹⁾ Diego Rivera ⁽²⁾

1 Universidad de Concepción. Email: jorgeespinosa@udec.cl

2 Universidad de Concepción. Department of Water Resources, Laboratory of Comparative Policy in Water Resources Management, CONICYT/FONDAP-15130015, University of Concepcion, Chillán, Chile. Email: dirivera@udec.cl

3.1. ABSTRACT.

In the highest part of the basin of the El Angel River (Northern Ecuador), there is an ecological reserve that has the same name of the watershed. The anthropogenic activities that take place in the basin concerning productive effects have influenced a change in land use, which has caused variations in supply and demand for water, so therefore it requires the analysis of vulnerability for talking decisions on water management using hydrologic modeling tools. The purpose of this investigation was to develop a methodology for analyzing vulnerability of water resource with the generation of different scenarios of simulation of land use changes during the years 2000 and 2014. The results demonstrate that when there are land use changes, the water vulnerability increases. To cope with climate change and variability it is necessary to generate adaptation and mitigation actions for water users.

3.2. INTRODUCTION

Mountain ecosystems are known as fragile ecosystem, providing important ecosystem services such as fresh water provision for anthropic activities and subsistence in high Andean cities, where water resources are limited (Millenium Ecosystem Assessment 2005; Camacho 2008, Espinosa et al. 2011, Mountain Agend, 1998). In terms of research, there is a need for further progress in the identification, valuation and vulnerability analysis of ecosystem services in South America (Balvanera et al., 2012).

In Ecuador, mountain ecosystems are known as páramo, which are areas consisting on plains, rugged glacial valleys with a variety of lakes, marshes and wet meadows with little anthropogenic presence and influence. The páramo is an ecosystem that has a particular

characteristic which consists on its ability to store water due to the high organic matter content (Buytaert et al. 2006). Water is constantly released during the year, becoming a productive, cultural and subsistence input. However, activities such as deforestation, agriculture, cattle ranching, and gold mining are causing severe environmental degradation, and the reduction of environmental services provided by Andean ecosystems (Magrin et al., 2014; Buytaert et al., 2004). Therefore, páramo is an area with high potential for various activities that promote the generation of financial resources to the communities that inhabit it. However, the hydrology of the páramo has not received the necessary attention; what is more, there is a low disposition, extent and coverage of meteorological and hydrological data (De Bievre et al. 2012). Additionally, the social importance of the páramo ecosystem is reflected in the large amount of people depending on its products, such as soil productivity; on this, traditional crops (Andean tubers), meat, milk, wool and fiber, which are very important for communities inhabiting there which also earn money from the trading of the different products (Beltran et al. 2009; Beltran 2010).

The watershed of El Ángel river, with an area of 256.76 km² and altitudes ranging between 3000 and 4100 meters above sea level, is a representative territory of the conditions of the Ecuadorian páramo where you can see how the ecological reserve and productive activities converge. The lowest area of the basin of El Angel in the province of Carchi (Ecuador), is one of the most productive agricultural zones which is severely limited in its productivity by an inadequate water management for irrigation, which affects the quantity, quality, distribution, access and management of water resources (Josse et al. 2000; INEC 2013). The variety of geographical, geological, climatic, geomorphologic and floristic features found in the Páramo made of it a diverse area in several aspects, because 10% of the flora of Ecuador could be displayed in these areas (Jorgensen et al. 1999) and are highly sensitive to human intervention. Thus, recent studies show that impacted areas by farming activities cannot be recovered (Farley 2007).

The increment of the vulnerability directly affects people: socially, economically, culturally and politically. This heightened vulnerability is rarely due to a single cause. Rather, it is the product of intersecting social processes that result in inequalities in socioeconomic status and

income, such social processes include, for example, alteration of ecosystems, disruption of food production and water supply and human settlements (IPCC 2014)

It should be noticed that the understanding of vulnerability in this area involves an accurate comprehension of the risks associated with the development of productive human activities, as well with inadequate assessment of the related impacts (Valencia 2013). This adequate assessment of using preventive and corrective measures will let us minimize or avoid cultural, ecological and hydrological impacts. Also, the socioeconomic level how is the pollution of aquifers, soil loss, changes in land use, drainage of peatlands that affect the welfare of the population and potential resources on which they depend, not forgetting the cause variations in the hydrological cycle, it is estimated that ecosystem services provided by these areas are about 40% of the planet per year (Valencia 2014)

It is important to mention that the term vulnerability directly relates to the susceptibility of damage and is characterized in terms of the degree that a watershed is likely to suffer due to exposure of the change in land use because of the reduction of production flows. This conceptualization is adapted from the generic definition which involves the change of land use as a specific threat that increases the risk (Ciurean 2013).

As the agricultural land use is expanding to higher areas of the páramo, this research seeks to assess the availability of water resources and identify the vulnerability under different modeling scenarios of land use and change. This will permit the appropriate use of available water resources and the generation of actions aimed at increasing agricultural productivity and livestock and expansion of irrigation.

3.3.MATERIALS AND METHODS

3.3.1. Area of study

The basin of El Ángel river is located close to the Equator line in the province of Carchi, with a total area of 256.76 km² (Figure 3.1.). At the highest part of the basin there is the presence of páramo with bushes and frailejones, *Espeletia ssp* – an endemic plant, conforming a unique ecosystem in the world. This area has belonged to "El Angel" Ecological Reserve since 1992. El Angel watershed, depending on the elevation bands is classified as: (1) subpáramo (3100-3400 m), with dominant vegetation of trees and shrubs (*Diplostegium*, *Hesperoneles*,

Vaccinium and Espeletia) and a layer of plentiful bryophytes; (2) Páramo (3500-3900 m), with grasslands (Calamagrostis, Agrostis, Hypericum), and elements of cañada forest (Alchemilla, polylepis, libanothamus and escallaria) and (3) superpáramo (over 3900), with vegetation that is composed by Calamagrostis, Agrostis, Carex and other grasses mixed with Espeletia and Bryophytes.

The Ecological Reserve of El Angel occupies an area of 95 km² (37% of El Ángel watershed) between 3,600 and 4,218 masl. Flora includes species that have characteristics of humid páramo– Subandino (frailejones, colorado, orchids, páramo leaves), while wildlife corresponds to deer, pudúes, curianguines, wolves and hawks. Remaining area of El Ángel watershed is dominated by different crops, and livestock due to the presence of the city of El Ángel

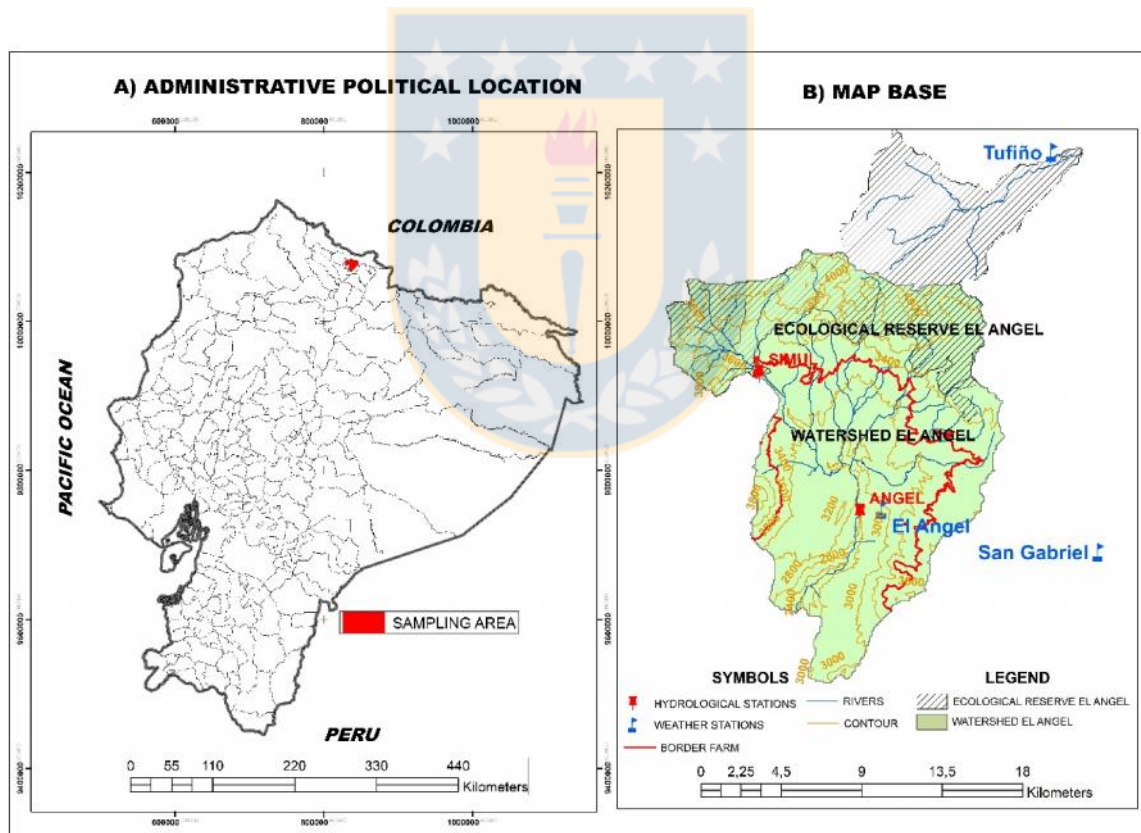


Figura 3. 1. Ubicación geográfica de la cuenca del Rio El Ángel (Sigagro,2002)

Agricultural production in El Angel watershed includes farms that are less than 1 hectare representing 28% of the total area, indicating that a significant percentage of families living at the basin are not depending on agricultural production. Furthermore 60% of farms have less than 3 hectares and only 14% have more than 7 hectares. Larger agricultural units are mainly located in the upper area of Páramo (3500-3900 meters, Figure 3.5.B and 3.5.C). Since year 2000 the agricultural border has approached the El Angel Ecological Reserve, due to the incorporation irrigation (FAO 1988; Espinosa 2011). Land use in the basin of El Angel river is linked with anthropic presence. Agricultural land has increased, pushing up the agricultural border close to the ecological reserve, causing an irreversible change in land use..

3.3.2. Climate

Climate in the area is cold for altitude above 3500 m., and semi-humid mesothermal for altitudes below 3000 m. Climate (Table 3.1.) is influenced by the presence of the Andes that produce a significant orographic effect contributing to the spatial variability of rainfall. Interannual variability is influenced by regional systems such as the Pacific Decadal Oscillation (Garreaud et al. 2008), El Niño Southern Oscillation (Villacis et al. 2001; Villacis et al. 2008) and the Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ) leading to a bimodal rainfall cycle (Ruiz et al. 2000; Poveda et al. 2007; Herzog et al. 2012).

Temperature (Figure 3.2.A) varies in a range of 0-18 ° C during the day, and monthly mean are in the range of 8.4 -12.2 ° C for a period of 20 years. Thus, mean temperature shows small intra-annual variation. Precipitation - hail, rain, and fog- is the element of climate that has greater sensitivity to topography, exposure to the humid mass and the wind direction. The study case presents a clear difference in precipitation according to altitudinal gradient with a variation of precipitation ranging from 730-1750 mm per year, as it can be seen in figures 2B, and figure 4.

The average annual evaporation reaches 1005 mm (1989-2012), equivalent to ca. 3 mm per day. Average annual humidity is 79%, the wind average speed recorded at El Angel station M 102 is of 2.3 km / hour, the average annual value of cloudiness is 5/8 reaching a monthly average maximum of 7/8 and average monthly minimum of 2/8.

Tabla 3. 1. Climatic variables with analyzed periods, Precipitation, Temperature (period: 1975- 2015), Evaporation, Heliophany, Relative Humidity, Cloudness and Wind (period: 1989 - 2012). Data from Instituto Nacional de Metereorología e Hidrología

ANUAL AVERAGE AND STANDARD DEVIATION PRECIPITATION, TEMPERATURE, EVAPORATION, HELIOPHANY, RELATIVE HUMIDITY, CLOUDNESS, WIND							
STATIONS	PRECIPITATION	TEMPERATURE	EVAPORATION	HELIOPHANY	RELATIVE HUMIDITY	CLOUDINESS	WIND
El Ángel	Mean 74	Mean 12,1	--	--	Mean 78,76	Mean 4,69	Mean 11,94
	STD 45	STD 1,33			STD 5,67	STD 1,51	STD 5,67
	1976 – 2013	1976 – 2013			1963 - 2012	1952 – 2012	1982 – 2012
San Gabriel	Mean 78,92	Mean 12,2	Mean 83,76	Mean 131,91	--	--	--
	STD 43,24	STD 0,83	STD 9,93	STD 24,2			
	1976 – 2013	1976 – 2013	1989 - 2012	1989 - 2011			
Tufiño	Mean 106,95	Mean 8,4	--	--	--	--	--
	STD 47,38	STD 0,51					
	1976 – 2013	1976 – 2013					

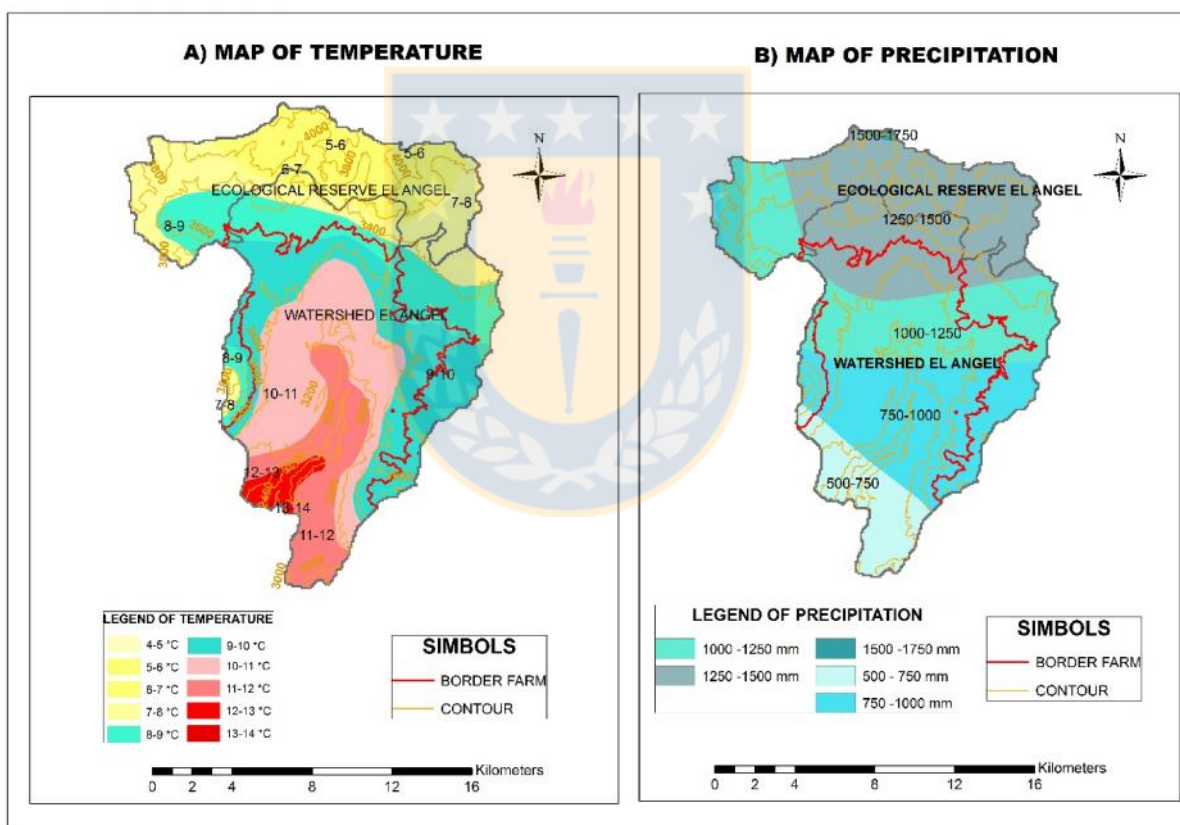


Figura 3. 2. A) Map of Temperature B) Map of Precipitation (Siagro, 2002)

Temperature (Figure 3.3.) varies in a range of 0-18 ° C during the day, and monthly mean are in the range of 8.4 -12.2 ° C for a period of 20 years. Thus, mean temperature shows small intra-annual variation.

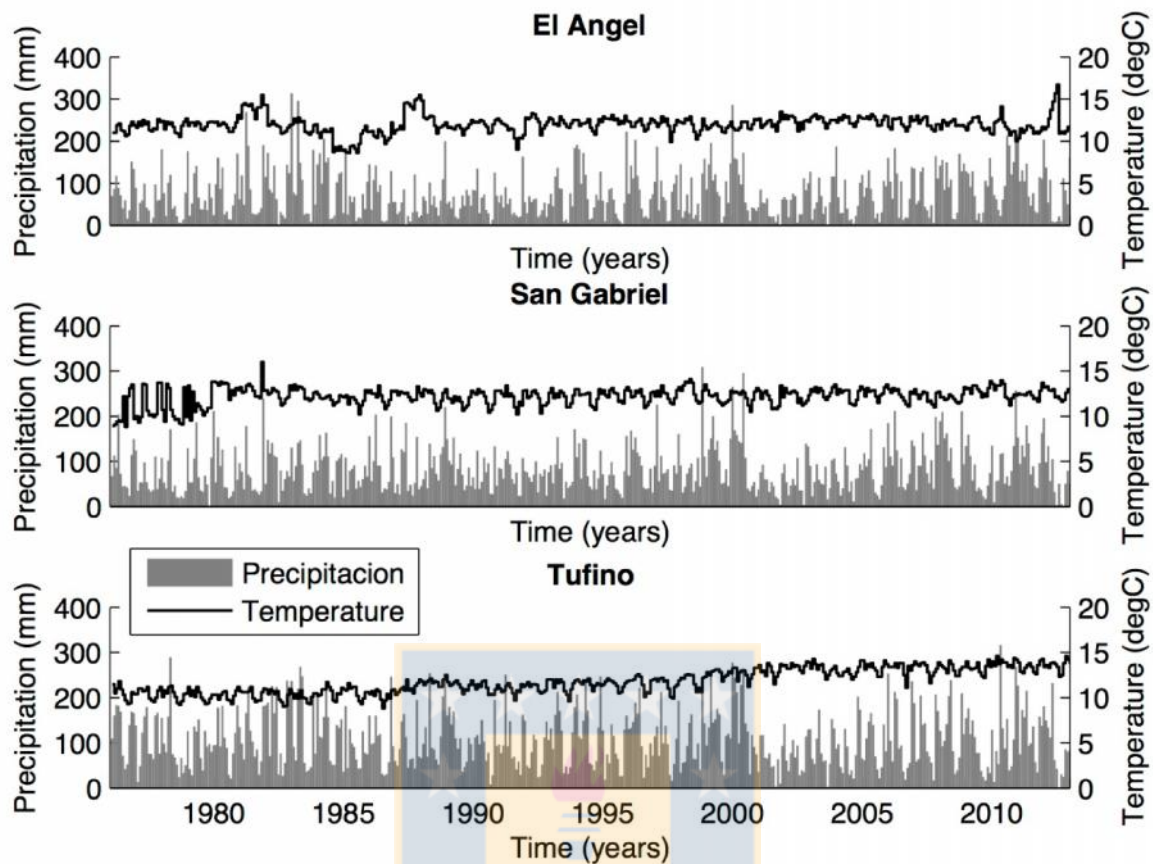


Figura 3.3. Average monthly time series of temperature and precipitation period 1976 - 2012

Precipitation - hail, rain, and fog- is the element of climate that has greater sensitivity to topography, exposure to the humid mass and the wind direction. The study case presents a clear difference in precipitation according to altitudinal gradient with a variation of precipitation ranging from 730-1750 mm per year, as it can be seen in figure 3.2.B, and figure 3.3.

3.3.3. Soils and current land use

Soil formations in the basin are predominantly volcanic and sedimentary soils in the middle and lower area. On steep slopes, soils are shallow and light-texture. There is a tendency to erosion under the influence of human action or of the remaining without protective vegetative cover (Proaño, et al. 1998). Soils are classified as Andosoles in the "World Reference Base for Soil Resources "(FAO / ISRIC / ISSS 1998), or Andisoles in the Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2003).

Despite the complex geology and topography, soils are relatively homogeneous. Soil physical properties are mainly determined by factors such as climate, and the existence of ash from volcanic eruptions of Quaternary (Winckell et al. 1991; Buytaert et al. 2005b). Cold humid climate and low atmospheric pressure favor the accumulation of organic matter in the soil which results in low bulk density and an open pore structure, so identified soils have a high capacity of water retention (80-90% saturation) (Buytaert 2004; Iñiguez 2003).

For this study was used the map of current land use for 2000 generated by the Geographical Information Systems for Agriculture (SIGAGRO) and coverage of current land use for 2014 (Figure 3.4.), the methodology is detailed in chapter 2.6 for land use. The main soil variables involved in this study are depth of soil, surface texture, topography, rock fraction, shallow rock cover, erosion, types of drainage, flood, alkalinity, and salinity. The classification criterion was obtained from the national soil map scale of 1: 50,000 (SIGAGRO 2002).

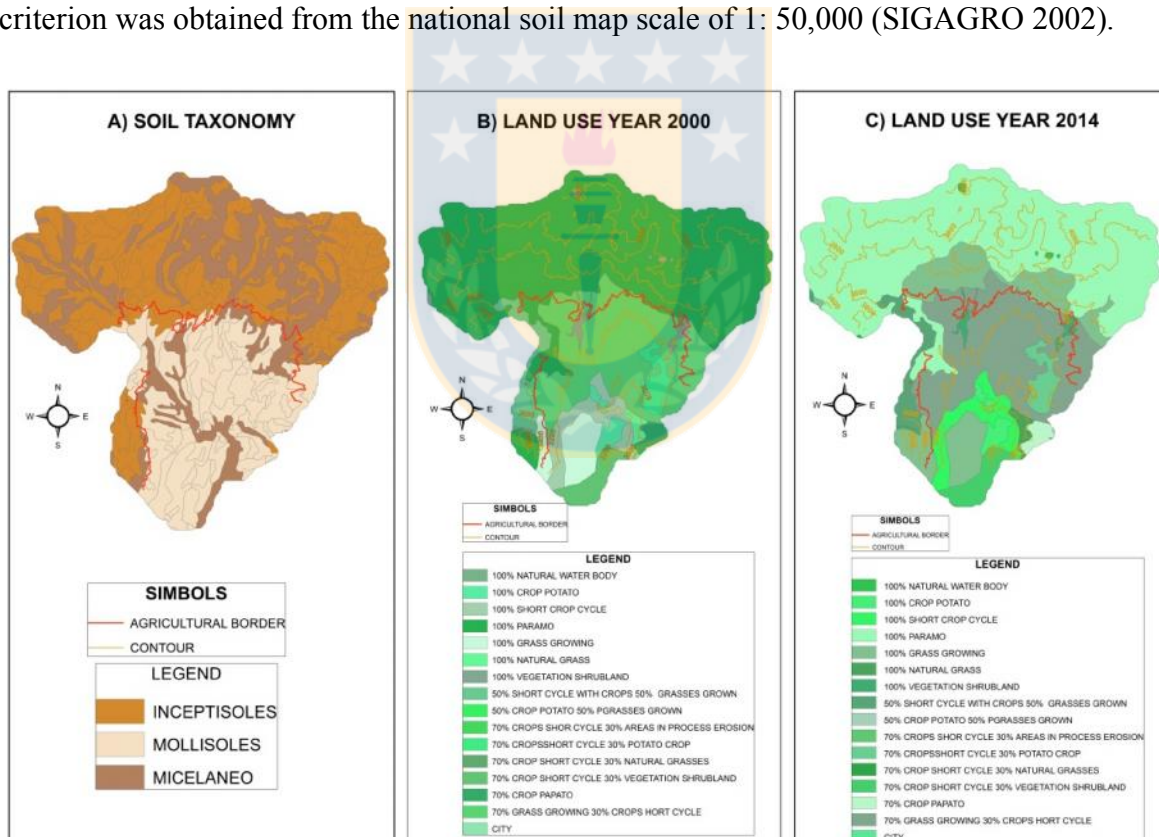


Figure 3. 4. A) Map of Soil Taxonomy B) Map of land use of the year 2000 C) Map of land use of the year 2014.

The main crops in the area of study are: potato (*Solanum tuberosum*), bean (*Vicia faba*), lupin (*Lupinus bogotensis*), beans (*Phaseolus vulgaris*), corn (*Zea mays*), different types of grasses and various types of short-cycle crops, which is why this area is considered one of the most productive in the province of Carchi. (INEC, 2013)

3.3.4. SWAT hydrological model

The hydrological model selected for this study was SWAT (Soil and Water Assessment Tool) because of its versatility to incorporate variables of soil, land use, slopes and climate through the platform GIS. SWAT is a physically based model for continuous simulation that operates daily time steps as a semi-distributed type within hydrological response units (HRU). These features enable accurate assessment of the impact it has on human activities on basin of water production. SWAT solves the water budget (Equation (3.1)) to determine the input, output and storage of water in the basin. Detailed description of the theoretical foundations of the model can be found in (Netsch et al, 2005a, 2005b)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dias} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

Where SW_t is the final water content in the soil on day t , SW_0 is the initial water content in the soil, t is the time in days, the sum extends over the total days simulated, daily rainfall is R_{dias} , Q_{surf} daily runoff, E_a daily evapotranspiration, W_{seep} daily percolation and Q_{gw} daily flow return.

SWAT has been widely used and validated in various spatial and temporal scales in Andean basins, (Espinosa 2011; Barrios et al. 2010; Yacoub al. 2010; Stehr et al. 2008; Stehr et al. 2009; Stehr et al. 2010a; Stehr et al. 2010b; Abu El-Nasr et al. 2005). Moreover, for the area of study there is no information of application of hydrological models therefore this research is important to create a baseline for the management of hydrological resources in the area and proper management of the El Angel ecological reserve.

Although field methods have been developed to measure soil parameters (such as hydraulic conductivity), virtually all models require calibration to adjust at least some of its parameters (Sorooshian et al. 1998; Torres 2005; Montroull et al. 2013). SWAT model calibration consist on giving a satisfactory fit between the observed and calculated runoff by changing

the values of the parameters of greater influence such as lateral flow, groundwater, surface runoff, curve number and balance of water. In turns, validation of the model consists on measuring the predictive ability by comparing the calculated and observed runoff with the parameters determined in the calibration phase, but in a different period. (Van Grienseven et al. 2006; Galvan 2007; Espinosa 2011).

3.3.5. Hydrologic areas of interest

The watershed of El Angel river was divided for this study into two areas of interest (sub-basins). Sub-basin 1 has no human intervention in productive activities, so the land use that predominates is the Páramo, Sub-basin 2 shows influence of productive activities can be found and there is páramo in the upper part of the catchment. Thus, the upper part of region shows páramo features, while downstream land presents agricultural use delimited by a red line (Figure 3.5).

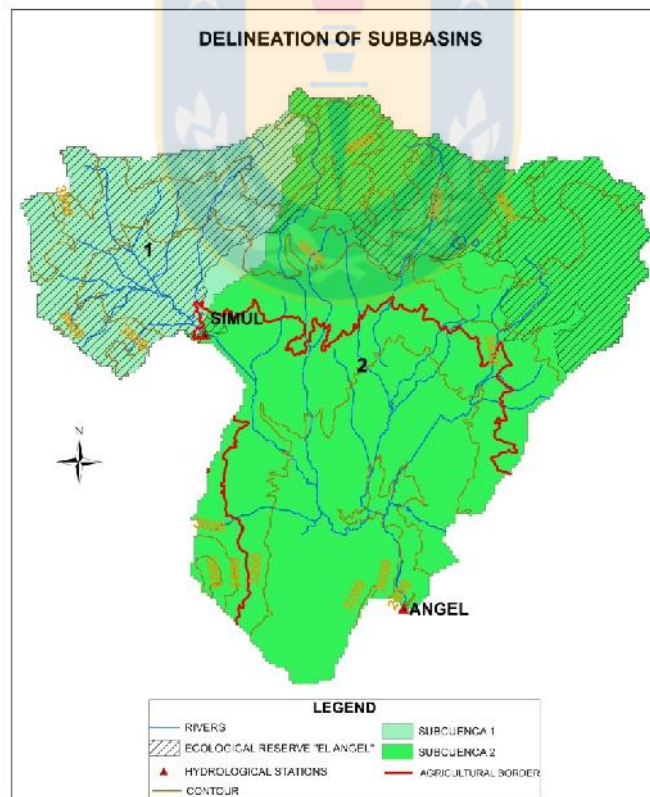


Figura 3. 5. Delimitation of sub-basins for hydrological modeling

3.3.6. Current land use map and generation of modeling scenarios

For the analysis of land use the years 2000 and 2014 were selected under the following considerations: in Ecuador until 2000 there is a map of land use generated by SIGAGRO in the year 2002, while the land use for the 2014 was generated from a Pleiades image from 05/24/2014 and 50 cm spatial resolution. Image was orthorectified image of 20 x 20 km in 2010 by the Center for Integrated Natural Resources and Remote Sensing (CLIRSEN) in the 2014. Similarly Census Population and Agricultural Census will be analyzed to generate different scenarios. Multi-temporal analysis allows the detection of changes between different reporting dates, deducting the evolution of the natural environment or the impact of human activity on the environment (Chuvienco 1996). The remote sensing classification applied in all processes for obtaining land use map of 2014 is supervised as training phase and maximum likelihood classifier as an allocation phase for the pixel values in the categories of classification. The classification criteria of the 2014 image was based on the map of land use for year 2000 (SIGAGRO 2002).

The main purpose of creating the simulation scenarios of land use was to assess the impact that land-use change would have on the streamflow at the watershed's outlet due to factors such as rural migration and orientation of policies and programs for agricultural development (INAFOR 2008, Espinosa 2011).

Table 3.2. shows the main features of each land use scenario between 2000 and 2014. There is a clear expansion of the agricultural frontier in the upper part of the basin, as there is an increase of cultivated grass with 9.34% (1718.72 ha), proportional to a reduction of the Paramo with 9.38% (1726.20 ha) (Figure 9). Also it shows that there is an increase of 0.06% (10.88 Ha) increase short-cycle crops and the city which can be translated.

Tabla 3. 2. Difference in area between 2000 and 2014 according to the change of land use in the study area.

CODE	DESCRIPTION OF UNITS OF LAND USE	AREA (Ha) YEAR 2000	AREA (Ha) YEAR 2014	CHANGE OF LAND USE
Pr	100% PÁRAMO	10899,60	9173,40	1726,20
Pc	100% CULTIVATED GRASS	762,37	2481,09	-1718,72*
Cc-Pc	50% SHORT CYLCE CROPS 50% CULTIVATED GRASS	471,83	479,31	-7,47*
Pc/Cc	70% CULTIVATED GRASS 30% SHORT CYCLE CROPS	4017,02	4015,32	1,70
Cc/Cp	CITY	8,41	10,12	-1,71*

.*. increase of land use.

3.3.7. Calibration and validation of the hydrological modeling

Model performance was evaluated by using the following indices: Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe 1970), Gupta Kling (Gupta et al. 1979) and the coefficient of determination of Pearson. The coefficient of efficiency (Nash, Sutcliffe 1970) determines the efficiency of the model, as the ratio of the observed variance flows and error variance of the simulation. The best simulation is when the value is 1. The coefficient of efficiency of Gupta-Kling is the modification of Nash-Sutcliffe coefficient (Gupta et al. 1979) that aims to reduce high flow problems. The determination coefficient of Pearson is a measure covering relation to the square of the combined dispersion of two series point to point (Akaike 1974).

Calibration and validation processes were performed by dividing the data available for the basin of El Angel river into two groups, using one of them for calibration and to refine the most sensitive parameters (from year 2000 to 2005) ,, and the second set of data for validation (2006-2011) to assess the predictive skill of the model.

3.3.8. Changes in water availability regarding changes in land use

Vulnerability analysis considers two methodologies at sub-basin scale, namely the Scarcity Index of River Area (HRU) and Aridity Index (AI), both considering the water availability for average hydrological conditions. The methodology adopted for this study was proposed by IDEAM 2009 and applied in Colombia in similar conditions of the El Ángel ecosystem. The information of the different parameters that will be involved in the different calculations

are those obtained from the water balance generated by SWAT. Thus, changes in the indices are related to changes in driving forces, such as land-use, and changes on the ecosystem services provided by the upper part of the watershed.

The aridity index is a quantitative indicator of water deficit that exists in a region according to their hydroclimatic regime (Table 3.3). This index relates three climatic variables: rainfall, temperature and evaporation. The aridity index has an important meaning for the water supply since the available energy (expressed in terms of potential evaporation) and precipitation significantly influence the actual evapotranspiration and surface runoff basins. The methodology used in this work follows Thornthwaite (1955), because of the availability of data in the country for its calculation (IDEAM 2010).

There are a number of proposals for defining the aridity index, which were made in accordance with the nature of the process that aims to describe the index. Some indices owe their formulation to vegetation characteristics, others only to the regime of precipitation or temperature. At the moment there are about thirty recognized equations that are intended to define the aridity of the different regions of the world. At first, it excels Köppen classification defining the aridity according to the presence or absence of vegetative species (1900). The first quantitative definition of aridity index was performed at the same time by Transeau and Visotsky in 1905. They proposed the aridity index (Equation 2) as the ratio of precipitation (P) and evaporation (E) annually. It is worth noting that the Aridity Index presents an static picture of the availability of water resources as averaged values are used.

$$Ia = \frac{P}{E} \quad (2)$$

Tabla 3. 3. Categorization aridity index adapted to the basin of the ricer El Angel (ENA, 2000).

CLASSIFICATION	CATEGORY	RANGE
1	HIGHLY DEFICIT	$\leq 0, 25$
2	DEFICIT	0.25 - 0.59
3	NORMAL AND WATER DEFICIT	0.60 - 0.89
4	NORMAL IN WATER	0.90 – 1.29
5	WATER SURPLUS	≥ 1.30

In order to evaluate the ratio of net water supply and demand conditions for the different units of analysis, were calculated indexes of scarcity, which were obtained with the following expression (IDEAM, 2009):

$$Ie = \frac{D}{O} \times 100\% \quad (3)$$

Where: **Ie**: Scarcity Index [%], **D**: Total demand for water [m³], **O**: Net surface water supply [m³].

The total demand for water to cover the basic needs of biological and cultural (4), and economic development of society type was estimated by integrating all activities that require water resources following Dominguez et al (2008):

$$DT = Dud + Dua \quad (4)$$

Where Dud is the demand for water for domestic consumption, and Dua is the water demand for agricultural use. The calculations for the demand of domestic water Dud (m³) is performed using the following equation.

$$Dud = Dpu * Nhu + Dpr * Nhr \quad (5)$$

Where DPCU is the urban per capita demand, Nhu is the number of urban dwellers, Dpr is the rural per capita demand, and hrn is the number of rural inhabitants.

Agricultural use requirements Dua (m³) are the most important because the study area is a rural area with high agricultural production. *Dua* was established as follows

$$Dua = \sum_{i=z}^n D_{ua}^i \quad (6)$$

$$D_{ua}^i = \begin{cases} 0 & \text{if } |p - (ETP * Kc_i)| \geq 0 \\ \text{abs}(|p - (ETP * Kc_i)| * ha_i SI) & \text{if } |p - (ETP * Kc_i)| < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Where D_{ua}^i the demand for the growing seasons, P is the annual precipitation, ha_i number of hectares by crop type, and n in the number of crops. Potential evapotranspiration ETP is calculated by the method of Hargreaves (Hargreaves et al. 1985), as it requires a few parameters giving acceptable estimates (Vega et al. 2009).

The obtained results of scarcity index are comparable with the pressure indicator that is used internationally (Table 3.4). It is worth mentioning that the total water demand was established according to agricultural production activities and climate variability among others. As the main changes in land use are due to increment in agricultural activities, there will be a corresponding increment and water demand. Thus, the Ie index allows to gauge the effect of increasing agricultural land on water resources.

Table 3. 4. Categories of scarcity indexes at hydrological response unit (IDEAM, 2010)

CLASSIFICATION	PERCENTAGE	DESCRIPTION
HIGH VULNERABILITY	> 40%	Demand reaches 40% of the water offered by water supplying source, denotes a great urgency for the management of supply and demand. In these cases the low water availability is a limiting factor for economic development.
MEDIUM VULNERABILITY	20% - 39%	The level of demand of water is between 20 and 40% of supply. It is necessary to prioritize the different uses and pay attention to aquatic ecosystems to ensure they receive the water supply required for its existence. Investments are needed to improve the efficient use of hydrological resources.
MODERATE VULNERABILITY	10 - 19%	Water requirements are between 10 and 20% of the water supply, indicating that water availability is becoming a limiting factor of development.
LOW VULNERABILITY	< 9%	Water demand does not exceed 10% of the volume of water provided by the fountain. No significant pressures on hydrological resources are experienced.

3.4. RESULTS AND DISCUSSION

3.4.1. Results of calibration and validation of the hydrological model

SWAT's simulations shows a good agreement between observed and simulated flows (Figure 3.6 and table 3.5) indicating a good overall performance of the model in each sub-basin on study. The model was able to capture inter-annual and intra-annual variations at the watershed's outlet, as well as low and high flows. For the calibration period, the model was able to reproduce natural variability, and the difference between simulated and observed values were within acceptable changes. Thus, the calibrated model shows predictive skill for analyzing simulation scenarios where the land-use pattern changes.

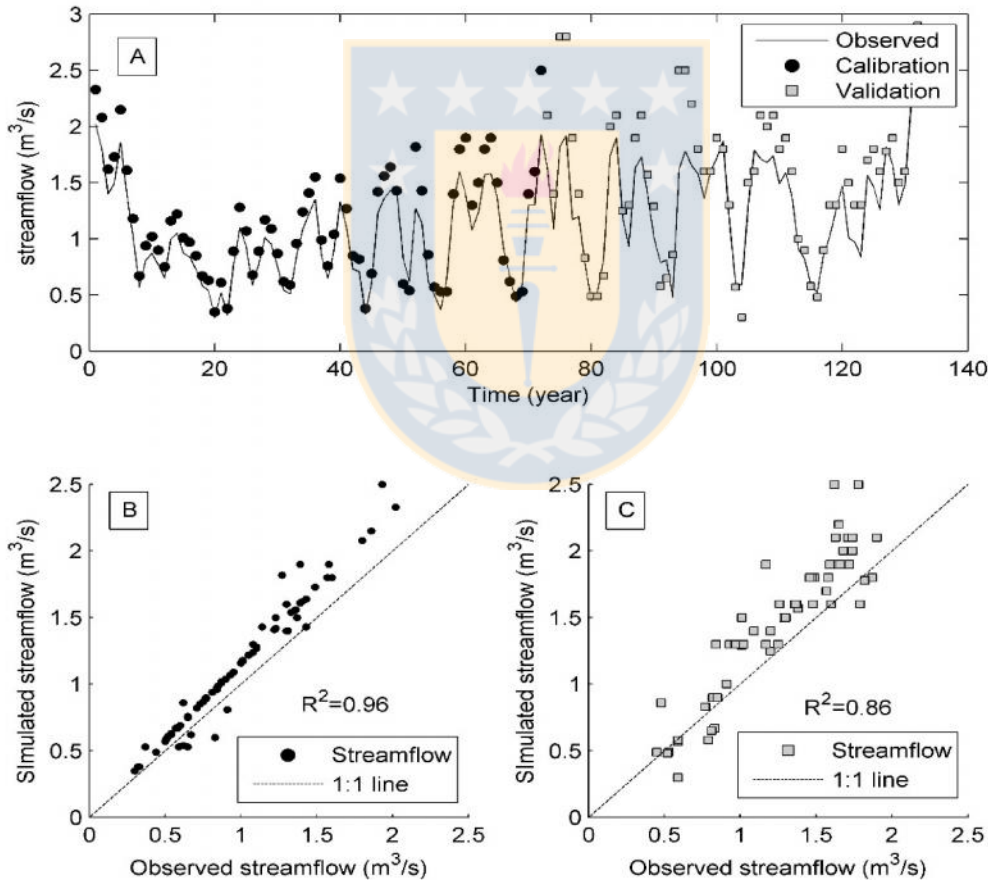


Figure 3. 6. Calibration and validation (monthly results) for Sub-basin 2 of El Angel river (A). Scatter plots for simulated flow in relation with observed flow regarding sub-basin 2 of El Angel river (B) Calibration (C) Validation

Tabla 3. 5. Statistical indicators (monthly medium flows) for the calibration and validation phases of the sub-basin 2 of the river El Angel

	SUB-BASIN 2	
	CALIBRATION	VALIDATION
R ²	0,96	0,86
NASH	0,59	0,53
GUPTA	0,84	0,75

3.4.2. Effect of changes on water availability

Regarding changes in water availability due to changes in land use, it is proposed that the differences of the evaluated indices –Water Scarcity and aridity index- serve as reference level of vulnerability in water dependent areas, in case of presenting a failure of the systems that eventually produce additional offer.

The aridity index (Table 3.6.A) for the period of January to May and the period of September to December rainfall exceeds evapotranspiration whereby the aridity index categorizes these months as surplus water (> 1.30), which varies in the period of June to August where categorization varies to normal water (0.90 - 1.29) to normal and deficit (0.90 - 1.29). Also it can be mentioned that the average annual aridity index is 1.74 which corresponds to a basin with surplus water (Figure 7). Sub-basin 2 (Table 6B), for the period of January to May and the period of September to December, shows that rainfall exceeds evapotranspiration whereby the aridity index categorizes these months as surplus water (> 1.30) to normal water (0.90 - 1.29) while in the period of June to August categorization varies from normal to normal and deficit water (0.90 - 1.29) to deficit (0.25 to 0.59). The annual average index of aridity a value of 1.29 corresponding to a basin with a normal water level.

According to UNESCO classification (Table 3.3) for the aridity index (UNESCO 1979; UNEP-United Nations Environment Programme 1997) climate is wet for annual values, but there is variability within the hydrological year with periods of hydrological deficit which is directly related to seasonal variability as the bimodal rain cycle (Ruiz et al. 2009; Poveda et al. 2007; Herzog et al. 2012).

It is important to mention that sub-basin 1 is within the ecological reserve, showing no deficit through the year. This situation does not occur in sub-basin 2 because it is on an area where the anthropogenic influence is established, so there must be an adequate management of water resources due to climatic conditions in this area. Thus, intervention of the páramo landscape must be under control. A changes in land use may cause negative effects on agricultural production because the amount of supply of natural water expressed in rainfall is concentrated in specific periods. Also vegetative cycles depend on the uniform distribution of water throughout the year, so adaptation measures for the risk of economic losses must be implement that may result from drought due to climate variability and climate change for which this methodology recommended raising scenarios for the future.

Tabla 3. 6. A) Aridity index for sub-basin 1, B) Aridity index for sub-basin 2

A) SUB-BASIN 1												
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURE	11,4	11,5	11,6	11,9	11,8	11,3	10,8	10,9	11,4	12,0	11,8	11,7
PRECIPITATION	95,7	88,4	136,7	141,6	117,3	55,2	40,6	37,9	64,7	117,8	126,0	114,0
EVAPORATION	52,3	54,6	53,3	56,7	56,2	48,8	50,9	49,7	54,0	55,4	56,2	55,7
ARIDITY INDEX	1,83	1,62	2,56	2,54	2,10	1,13	0,79	0,76	1,19	2,12	2,24	2,04

B) SUB-BASIN 2												
VARIABLE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURE	12	12,1	12,2	12,5	12,4	11,9	11,4	11,5	12	12,6	12,4	12,3
PRECIPITATION	89,1	74,9	109,4	95	64,8	31,3	30,2	28,6	56,5	84,9	110,8	119,8
EVAPORATION	55,4	57,8	56,5	60,0	59,4	51,7	54,1	52,8	57,3	58,6	59,4	58,9
INDEX	1,60	1,29	1,93	1,58	1,09	0,60	0,55	0,54	0,98	1,45	1,86	2,03

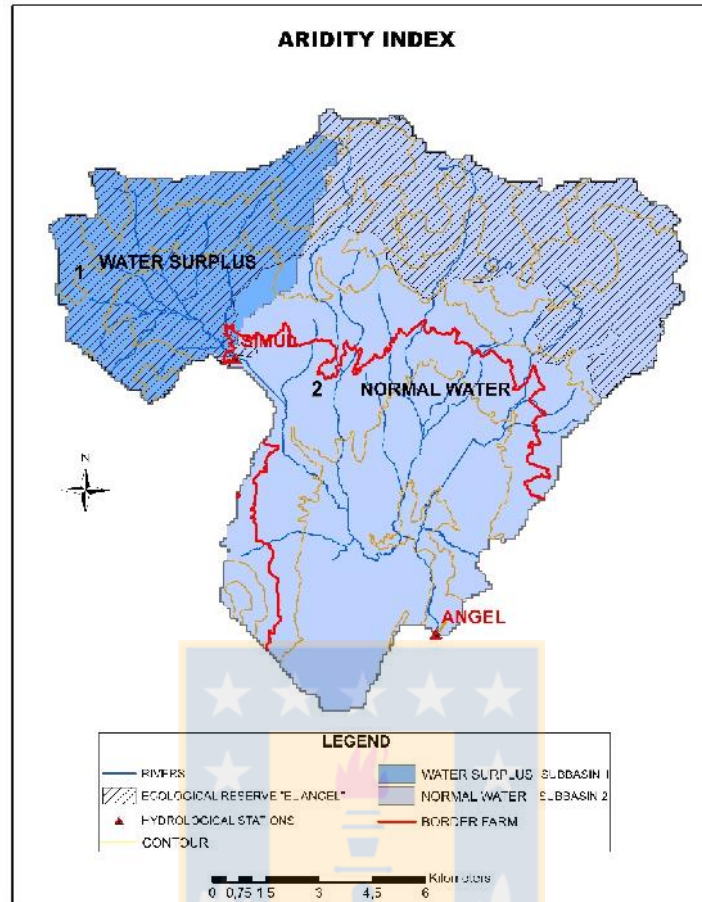


Figura 3. 7. Spatial distribution of average annual rate of vulnerability of the delimited sub-basins of the basin of the river El Angel.

- **Scarcity index at hydrological response unit**

The scarcity index was evaluated for water demand in the period 2000 and 2014 and the average supply for the period 1976-2013 (Figure 3.8), in accordance to the scenarios of land use established for this study in the table 4 and 5. The variation in the index of scarcity obtained between 2000 and 2014 is directly associated with change in land use, which directly affects the soil retention capacity by a change in the structure and evapotranspiration which alters the hydrological cycle of the basin (Buytaert et al 2007).

The scarcity index evaluated between 2000 and 2014 shows a clear increase (Table 3.7) of the area that is identified as medium vulnerability category (1262.13 hectares), which is associated with the change that exists in this index in the categories of low vulnerability and

moderate. This is directly related to the proposed change of land use between 2000 and 2014, clarifying that the category of high vulnerability is stable because there is no change in the urban area.

3.5. DISCUSSION

The basin study at hydrological response unit using hydrological models is uncommon due to the limited information in high Andean zones. One of the outstanding studies on this topic is identified by Hems (in Tognetti 2008) where due to continuous burning cloud forest in Kilimanjaro have directly affected the decrease of 20 million m³ of water per 15,000 (ha) of forest, which is related to the tree canopy as epiphytes (mosses and lichens) absorb and retains moisture and then releases it by dripping. According to information from Oesker in 2008 mentions that in Andean areas for every 100 meters of elevation, precipitation increases 150 mm, up to 2600 meters above sea level, this process should be added horizontal precipitation with 40 mm per 100 meters because it becomes the only water supply to the water system as highlighted Buytaert et al. (2006). It is unknown how much water is intercepted by vegetation and how much into streams, but it is estimated that you can add from 5 to 20%, these estimates are still logged in cloud forests in Asia (Bruijnzeel 2004). Buytaert et al (2006) indicates that it is estimated in Colombia that the production of water in the Páramo is 665 mm per year while in some regions of Ecuador production is between 600 and 1000 mm per year which is equivalent to 2/3 of the annual rainfall, which is due to high rainfall (ranging between 700 and 3000 mm) and well distributed throughout the year thanks to the characteristics of the vegetation and soil characteristics, making any kind alteration in such ecosystems creates irreversible changes to the hydrological cycle. Also changes in soil structure due to the presence of farm work and erosion will be virtually impossible to restore the páramo hydrological service (Buytaert et al 2006). The second watershed has a hydrometric station of El Angel will calibrate and validate the model in this area..

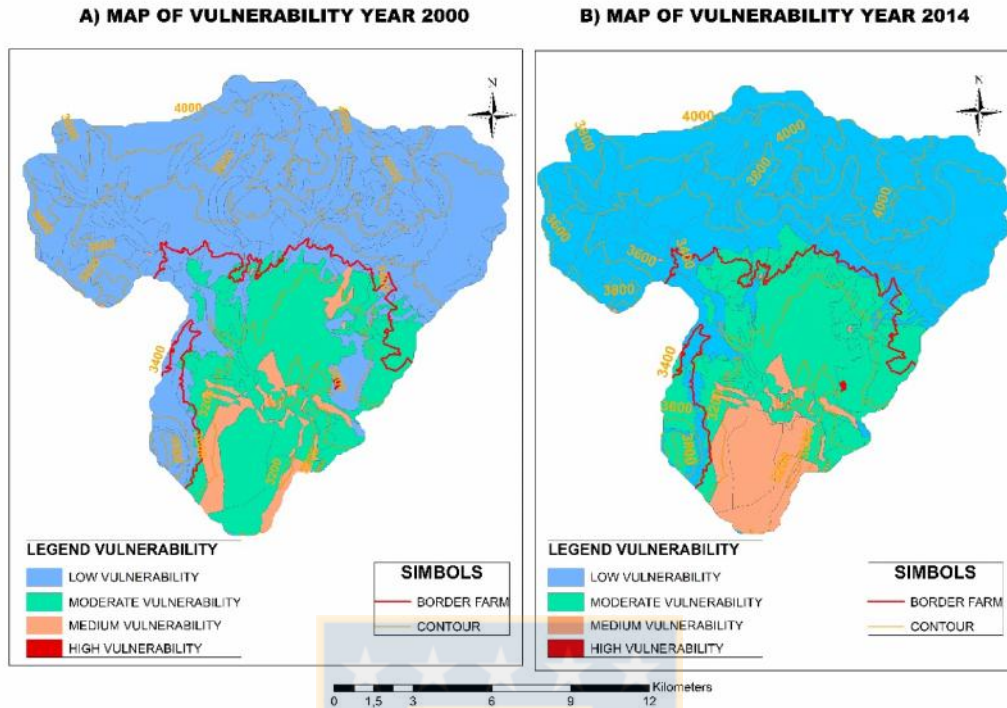


Figura 3. 8. Vulnerability map established for different scenarios of land use in the micro-basin of the river El Angel A) Vulnerability of the year 2000 B) Vulnerability of the year 2015.

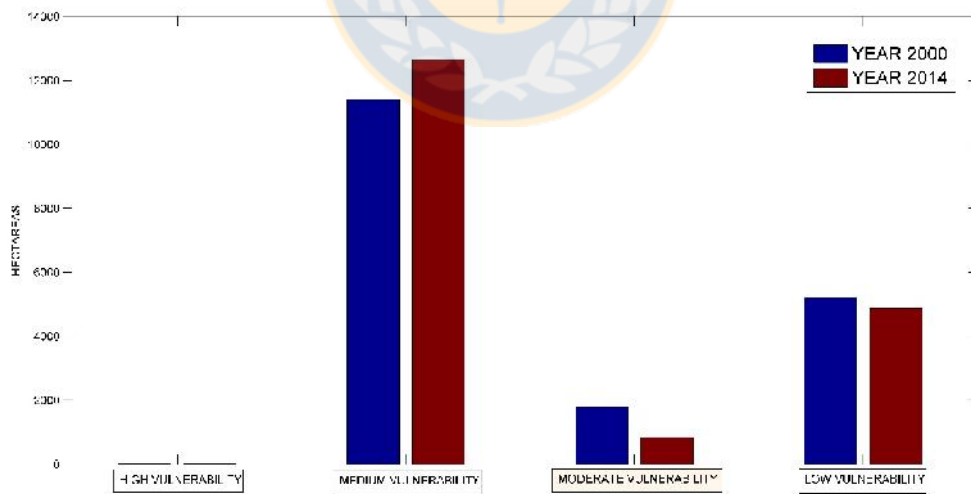


Figura 3. 9. Variation of scarcity indexes of the basin of the river El Ángel

Tabla 3. 7. Scarcity indexes of the basin of the river El Ángel

CATEGORY	YEAR 2000 HECTARE S	YEAR 2014 HECTARE S	CHANGE OF VULNERABILITY HECTARES
HIGH VULNERABILITY	8,41	8,41	0
MEDIUM VULNERABILITY	11399,36	12661,49	1262,13
MODERATE VULNERABILITY	1780	843,82	-936,18
LOW VULNERABILITY	5206,97	4881,01	-325,96

3.6. CONCLUSIONS

The advance of the agricultural frontier in the páramo is increasing the vulnerability of the El Ángel watershed due to increasing water demands for evapotranspiration and loss of water retention capacity from the soil. The páramo produces by flows between 19 to 40 l/s per km² as monthly average with strong seasonal variations. The aridity index, as it solely depends on climate variables, does not show changes. Opposite, the Scarcity index is sensitive to land use changes when water demand is estimated based on crop patterns.

Results show that increasing pressure for water is affecting the páramo. The need of agricultural land is increasing and pushing the frontier to the upper part of the watershed, where most of the water is produced and stored. As the communities are approaching to the tragedy of the commons, it is necessary to establish adaptation strategies that enable the development of anthropic activities through planning and land use for decision-making concerning the management of the basin with the integrated management of hydrological resources with the participation of government agencies involved directly or indirectly to improve the efficiency of water use.

This study should be considered as a tool for water management resources in the watershed of El Angel River. The results obtained in hydrological modeling, using the modeled scenarios of land use in the years 2010 and 2014, show a clear reduction of flows that are attributed to human intervention in productive activities. It is noteworthy that the quantification of flow in the paramo area has no human intervention through the use of tools that were validated and calibrated to give clear perspective of production flows in the Andean highlands.

3.7. ACKNOWLEDGEMENTS

This research was benefited from FONDECYT Grant No 1160656 and CONICYT/FONDAP-15130015. We would like to thank to reviewers for their guidance and suggestions to improve the manuscript. Thanks to Roto Quezada for supporting our research.

3.8. REFERENCES

- Abu El-Nasr A, Arnold J, Feyen J, Berlamont J (2005) Modeling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrological Processes* 19: 573-587.
- Akaike H (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 19, 716-723.
- Balvanera P, Uriarte M, Almeida-Leñero L, Altesor A, DeClerck F, Gardner, T and Matos D, (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services*, 2, 56-70.
- Barberi F, Coltelli M, Ferrara G, Innocenti F, Navarro J, Santacrose R (1988) Plio-quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125: 1–14.
- Barrios A, Urribarri L (2010) Application of SWAT model in the Venezuelan Andes high Chama River Basin, *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 51, núm. 1, enero-junio, pp. 11-29
- Beltran K. (2010) Socioenvironmental diagnosis of Chimborazo Province. Quito: EcoCiencia.
- Beltrán K., Salgado S, Cuesta F, Yanez. S, Romoleroux K, Cardenas A, Velastegui A (2009). Spatial distribution, ecological systems and floristic characterization of the paramos in Ecuador. *Ecociencia*, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA, Quito.
- Bruijnzeel L.A (2004) “Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 185–228.

- Buytaert W (2007) analysis of the uncertainty application of hydrological models in the estimation of the water supply. Research workshop presentation on environmental services in mountain ecosystems in the northern and central Andes o. Lancaster-Bristol
- Buytaert W, Célleri R, De Bièvre B, Cisneros F, Wyseure G, Deckers J, Hofstede R (2006) “Human impact on the hydrology of the Andean páramos”. *Earth-Science Reviews* 79, 53–72
- Buytaert W, Célleri R, DE Bièvre B, Iñiguez V (2007). The impact of pine plantations on water yield: a case study from the Ecuadorian Andes. IAHS-AISH publication, 225-228.
- Buytaert W, De Bièvre B, Wyseure G and Deckers J (2004) The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8: 108–114.
- Buytaert W, De Bièvre B, Wyseure G, and Deckers J (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8(1), 108-114.
- Buytaert W, Sevink J, Leeuw B, Deckers J (2005b). Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian pramo region. *Geoderma*, in press.
- Camacho A (2008) Management and protection of wetlands in water policy of Spain. En: del Moral, L. & N. Hernández (eds). *Panel Científico-Técnico de Seguimiento de la Política de Aguas*. Universidad de Sevilla.
- Cañadas L (1983) *The Bioclimatic and Ecological Map of Ecuador*. MAG – PRONAREG. Quito – Ecuador. 210 p. Código: 08004 Ec.
- Cao W, Bowden WB, Davie T, Fenemor A (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes* 20: 1057-1073.
- Chuvienco E (1996) *Fundamentals of Remote Sensing 3era revised edition*. Ediciones RIALP, Madrid. España.

- Ciurean R 2013 “Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction”, in *Approaches to Disaster Management - Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters*, J. Tiefenbacher, ed, InTech 2013.
- Colmet - Daage F, Cucalon F, Delaune M, Gautheyrou J, Gautheyrou M, Moreau B (1967) Caracteristiques de quelques sols d'Equateur d'erivés de cendres volcaniques. II. Conditions de formation et d'évolution. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 5: 353–392.
- Córdova M, Carrillo G, Célleri R (2013). Errors in the estimation of reference evapotranspiration of Andean plateau area due to the use of monthly, daily and hourly information. *Aqua-LAC*, 5(2), 14-22.
- De Bièvre B (2004) Effects of plant covering in watersheds moor. Research Department of the University of Cuenca.
- De Bièvre B, Buytaert W, Wyseure G, Deckers J (2005) The effect of land use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes* 19: 3985 - 3997.
- De Bièvre B, Iñiguez V, Buytaert W (2012) Hydrology of the Paramo. Importance, properties and vulnerability. In: Mena Vásconez, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Lasso B., S., Medina, G., Ochoa, N., Ortiz, D. (Eds.), *Paramo. Studied landscape, inhabited, managed and institutionalized*. Ecociencia/Abya Yala.
- Dominguez E, Rivera H, Sarmineto R, Moreno P (2008) Examples of demand and supply of water and the rate of water scarcity as an assessment tool of the water resources of Colombia s. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 32 (123): 195-212, 2008. ISSN 0370-3908.
- Eckhardt K (2005) How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrological Processes* 19: 507-515
- Espinosa J, Uribe H, Arumí J, Rivera D, Stehr A (2011) Vulnerability of water resources regarding agricultural activities in different sub-basins of the Rio Limarí. *Gestión Ambiental*. 22: 9-26.

- FAO-ISRIC-ISSS (1998) World reference base for soil resources.
- Farley K. (2007) Grasslands to tree plantations: forest transition in the Andes of Ecuador. *Annals of the Association of American Geographers* 97:755-771
- Galván L, Olias M, Fernández R, Domingo J (2007) Application of SWAT hydrological model to the Meca river watershed (Huelva, Spain). *Geogaceta* 42: 63-66.
- Garreaud R, Vuille M, Compagnucci R, Marengo J (2008) Present-day South American Climate. *PALAEO Special Issue (LOTRED South America)* 281:180-195.
- Garreaud R, Vuille M, Clement C, (2003) The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194:5-22.
- Gosain A, Rao K, Srinivisan S, Reddy N (2005) Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrological Processes* 19: 673-682.
- Govender M, Everson C (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model *Hydrological Processes* 19: 683-692.
- Gupta S, Larzon W (1979) Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research* 15(6): 1633- 1635.
- Hargreaves G.L, Hargreaves G.H, Riley J.P (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. And Drain. Engr.* 111(2):113 – 124.
- Hernandez M, Miller S, Goodrich Z, Bfgoff W, Kepner G, Edmonds CM, Jones KB (2000) Modeling runoff response to land cover rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment* 64: 285-298
- Herzog S, Martinez R, Jorgensen P, Tiessen (2012) Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes. *Inter-American Institute for Global Change Research. Sao Jose dos Campos y Comité Científico sobre los problemas del medio Ambiente, Paris.* 426 pp.

IDEAM, ONU, MDGIF (2009) Indicators, trends and hydrological scenarios for climate change, Joint integration of ecosystems and adaptation to climate change. June 2009. 12-28.

IDEAM, ONU, MDGIF (2010) Indicators, trends and hydrological scenarios for climate change, Joint integration of ecosystems and adaptation to climate change in the Colombian Massif.

INAMHI (2013) Weather Yearbook . Quito – Ecuador 180 p.

INEC (2013) Surface survey and Agricultural Production. 64 p.

Iñiguez V (2003) Water balance of watersheds paramo. Undergraduate thesis, University of Cuenca, Faculty of Engineering, Cuenca.

Instituto Nacional de estadísticas y Censos (2014)
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/> información en línea

IPPC (2014) Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary Policymakers, Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Jorgensen M, Leon - Yanez (1999) Catalogue of the vascular plants of Ecuador. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden 75.

Josse C, Camacho F, Navarro G, Barrena V, Becerra T, Cabrera E, Chacon E, Ferreira W, Peralvo M, Saito. J, Tovar A, Naranjo G, Physical Geography and Ecosystem Tropical Andes. Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes. Inter-American Institute for Global Change Research. Sao José dos Campor y Comité Científico sobre los problemas del medio Ambiente, Paris. 117 - 192 pp.

Josse C, Cuesta F, Navarro G, Barrena V, Cabrera E, Chacón E, Peralvo W, Saito M, Tovar A (2009) Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA, CONDESAN- Proyecto Páramo Andino, Programa Bio Andes,

EcoCiencia, NatureServe, LTA-UNALM, IAvH, ICAE-ULA, CDCUNALM, RUMBOL SRL. Lima.

Josse C, Mena M, Medina G (2000) La Biodiversidad de los Páramos. Serie Páramo 7. GTP/Abya Yala. Quito.

León – Yáñez S (1993) Estudio ecológico y fitogeográfico de la vegetación del páramo de Guamaní, Pichincha - Napo, Ecuador. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito.

Magrin G, Marengo J, Boulanger J, Buckeridge M, Castellanos E, Poveda G, Scarano F, and Vicuña S, 2014: Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.

Mena P, Balslev H (1986). Comparison between the vegetation of the paramo and the afro-alpine belt. AAU Reports 12.

Mena P, Hofsdefe R (2006) Los páramos ecuatorianos, Botánica Económica de los Andes Centrales: 91 -109.

Millenium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water. Island Press, Washington, D.C. <http://www.MAweb.org>

Monterrey D (2002). Financing for Sustainable Development in Latin America and the Caribbean.

Montroull N, Saurral R, Camilloni A, Sörensson A, Menendez C, Ruscica R (2013) Future hydrological scenarios in the region of Esteros del Ibera in the context of climate change, Meteorológica [online]. vol.38, n.1

- Nash J, Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models, part 1a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3): 282-290.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S. L., J. C. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams and K. W. King (2002a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Newman M, Compo G, Alexander M (2003) ENSO-forced variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*. 16:3853-3857.
- Oesker M, Dalitz H, Gunter S, Homeier J, Matezki S (2008). Spatial Heterogeneity Patterns – a Comparison between gorges and ridges in the upper part of an evergreen lower montane forest. Gradients in a tropical mountain Ecosystem of Ecuador. *Ecological Studies* 198.
- Pasqualini, S., Cassiodoro, G., and Dellepiane, J. M. (2016). Logistical mobility in plateaus in Central-Western Santa Cruz, Argentina. An approach from technological, archaeofaunal and anthracological evidence. *Quaternary International*.
- Patiño Narváez, N. A. (2016). Classification of land covering in the rural floor of the Pupiales-Nariño municipality by applying SIG tools SIG.
- PNBV (2009) National Development Plan. National Welfare Plan period 2009 – 2013: *Construyendo un Estado Plurinacional e Intercultural*. ISBN: 978-9978-92-794-6.
- PNBV (2013) National Development Plan. National Welfare Plan period 2013 - 2017: *Construyendo un Estado Plurinacional e Intercultural*. ISBN: 978-9978-92-794-6.
- Poveda G (2004) The hydroclimatology of Colombia: a synthesis from the inter-decadal scale to scale daytime. *Revista académica Colombiana de Ciencias* 28(107): 201-222.

Poveda G, Velez J, Mesa O, Cuartas A, Barco J, Mantilla R, Mejia J, Hoyos C, Ramirez J, Ceballos. L, Zuluaga M, Arias P, Botero B, Montoya M, Girado J, Quevedo D, (2007) Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering* 12:4-13.

Proaño M, Paladines O (1998) Analysis of farming systems of small and medium producers of the Angel River Basin, Consorcio Carchi – Ecoregión Rio El Ángel, Proyecto MANRECUR FUNDAGRO/CIID, Carchi, Ecuador.

Ruiz D, Arroyave P, Molina M, Barros J, Gutierrez M, Zapata. P (2009) Signals of climate variability/change in Surface water supply of high-mountain watersheds – case study: Calro river high mountain basin. Los Nevados natural Park, Andean Central Mountain Range, Colombia. World Bank Group. 207 pp.

Sauer W (1957) El mapa geológico del Ecuador. Editorial Universitaria, Quito.

Schneider N, Conuelle B, (2005) The Forcing of the Pacific decadal Oscillation. *Journal of Climate* 18: 4355-4373.

SIGAGRO (2002) Map of land use year 2000 (scale 1:50,000). Ministerio de Agricultura, Ecuador.

SIGAGRO (2002) Map of soil taxonomy of Ecuador (scale1:50,000). Ministerio de Agricultura, Ecuador.

SIGAGRO (2002) Map of the El Angel watershed for year 2000 (scala 1:50,000). Ministerio de Agricultura, Ecuador.

Soil Survey Staff (2003) Andisoles en la Soil Taxonomy.

Stehr A (2008) Analysis of the hydrological behavior and water availability under climate change scenarios for two sub-basins of the Biobio river incorporating the impact of the snow in the mountainous area. Ph.D. thesis, Universidad de Concepción, Chile. 1: 115 pp.

- Stehr A, Aguayo M, Link O, Parra F, Romero O, Alcayaga H (2010) Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 1963–1977.
- Stehr A, Debels P, Arumí J, Alcayaga H, Romero F (2010) Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático, experiencia de dos cuencas del centro-sur Chileno. *Tecnología y Ciencias del Agua* 1(4): 37-58.
- Stehr A, Debels P, Arumi J, Romero O, Alcayaga H (2009). Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal* 54(6): 1053-1067.
- Stehr A, Debels P, Romero F, Alcayaga H, (2008) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal* 53 (3): 588-601
- Thornthwaite C. W, (1948): An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- Thornthwaite C. W, Mather, J. R., 1955: The Water Balance. *Publications in Climatology, Laboratory of Climatology, Vol. 8, No. 1, 104 pp*
- Tognetti S (2008) La ciencia en la niebla y los misterios de los bosques nubosos. *Flows No. 8. IIED, Banco Mundial, Bank-Netherlands Watershed Partnership Program.*
- Torres E, Mejía E, Cortes J, Palacios E, Exebio A (2005) Adaptation of a hydrological simulation model to the Rio Laja watershed, Guanajuato, México. *Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. 2 Manejo Integral de Cuencas S.A. de C.V. 56234. Colonia Netzahualcoyotl. Texcoco, Estado de México*
- Trenberth E, Stepaniak D (2001) Indices of el Niño evolution. *Journal of Climate* 14:1697-1701.
- Tripathi M, Raghuwanshi N, Rao N (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes* 20: 1137-1156.

- UNEP-United Nations Environment Programme (1997) World atlas of desertification. London.
- UNESCO (1979) Map of the world distribution of arid regions: Explanatory note. Paris: UNESCO.
- Valencia M, Figueroa C. 2013. Vulnerability of High Andean wetlands to change processes: trends analysis. Magazine Engineering University of Medellin.
- Valencia M. (2014) Vulnerability gaps moor anthropic degradative processes incorporating environmental complexity of the territory. PhD thesis. Universidad del Cauca. 303P.
- Vangriensven A, Meixner T, Grundwald. S, Bishop T, Sirinivasan Y (2006) a global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal Hydrological 324: 10-23.
- Vega E, Jara J (2009) Estimating reference evapotranspiration for two areas (coastal and Andean region) of Ecuador. *Engenharia Agrícola*, 29(3), 390-40
- Villacís J, (2001) Test influence on the precipitation in the Central Andes of Ecuador. Titling Project, Quito.
- Villacís M, (2008) Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : le cas du volcan Antisana. Ph.D. Thesis, University of Montpellier II, France, 231p.
- Wagener T, Wheater H, Gupta V (2004) Rainfall – Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Cathment, Imperial College Press London. 41: 1-14.
- Winckell A, Zebrowski C, Delaune M., (1991) Evolution de mod`ele quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Equateur. *G´eodynamique*, 6: 97–117.
- Yacoub C, Perez A., (2010) Assesing slope influence in arcswat models of andean watershed. VIII International Conference on Water Resources.

4. CAPITULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. DISCUSIÓN GENERAL

En este capítulo se abordará un resumen general de los principales resultados obtenidos y conclusiones generales obtenidas durante la realización de este trabajo, para posteriormente presentar una breve discusión de las líneas de investigación que se generaron a partir de este trabajo doctoral.

4.1.1. Estudio de Permeabilidad de suelos aplicada a la generación de cartografía temática de permeabilidad en dos cantones de la Provincia de Loja, Ecuador

La complejidad que presenta determinar la variación espacial de la permeabilidad de suelos de un área determinada, se enfoca principalmente en el proceso de recolección de información, debido a que este parámetro se encuentra íntimamente ligado a características propias de Geología, Morfología, Ambiente, Cobertura vegetal, Pendientes entre otras. (Guatibonza et al., 2009)

Las metodologías existentes para la recolección de información de permeabilidad de suelos (infiltración) son generalmente establecidas en áreas pequeñas, lo cual impide que sean representativas para el área de estudio, lo cual es el principal limitante del infiltrómetro de doble anillo, por esta razón se propone el uso del infiltrómetro de disco la cual permite la recolección de mayor número de muestras optimizando tiempo y costos asociados al equipo, instalación, personal entre otros.

Integrar información relevante de geología, morfología, ambiente, cobertura vegetal y pendientes mediante los sistemas de información geográficos permite obtener áreas representativas con características físicas similares en las cuales se puede establecer sitios de muestreo que permitirán extrapolar información de permeabilidad de suelos mediante la correcta aplicación de funciones de pedotransferencia (Reynolds et al., 2002).

La variabilidad espacial que presentan los suelos respecto a la permeabilidad del suelo y la importancia de este parámetro en la gestión de los recursos naturales así como para la identificación de áreas con características óptimas para el establecimiento de riego hacen de esta metodología una herramienta adecuada para la gestión de cuencas hidrográficas en las cuales se carece de este tipo de información.

Desde el punto de vista metodológico, se puede destacar que la metodología aplicada permite la obtención de resultados satisfactorios, que se ajustan a otros métodos existentes, sobretodo donde las condiciones de accesibilidad no permiten el levantamiento de información, además hay que recalcar que la metodología presentada es de fácil manejo, con rapidez de obtención de datos fiables unido a la posibilidad de reproducir in situ varios experimentos.

4.1.2. Estudio de la vulnerabilidad hídrica del páramo ecuatoriano frente al cambio de uso y actividades antrópicas en la cuenca del Rio el Ángel.

La gestión adecuada de los recursos hídricos en cuencas de montaña es de vital importancia debido al papel fundamental que cumple en el abastecimiento de agua en las ciudades de altura la cual coadyuva en el normal desarrollo de actividades sociales y económicas, entre las herramientas útiles para evaluar los cambios que pueden ocurrir debido a las diferentes actividades antrópicas se encuentran los modelos hidrológicos que pueden predecir el comportamiento de una cuenca hídrica frente a los cambios que pueden producir las actividades antrópicas principalmente cuando las alteraciones están ligadas con el cambio de uso de suelo asociado a las actividades productivas y las repercusiones que pueden ocurrir sobre la oferta hídrica con lo cual se puede apoyar la toma de decisiones.

El cambio de uso de suelo en la cuenca del rio El Ángel esta íntimamente ligado con las actividades agrícolas productivas debido a que existe avance de la frontera agrícola en el área del páramo que se ubica sobre los 3700 metros de altitud donde comienza el límite de la reserva ecológica del páramo de El Ángel, cabe aclarar que la cuenca en estudio se encuentra en un rango de altura entre los 3600 y 4218 metros de altura

La producción hídrica del páramo por Km² de acuerdo a la modelo hidrológico en condiciones normales sin intervención de actividades antrópicas se encuentra en el rango de los 19 l/s a 40 l/s en promedio mensual en el área donde se encuentra el ecosistema paramo este rango de caudal varia específicamente de la época del año.

Respecto a la calibración y validación del modelo hidrológico se debe mencionar que la verificación de resultados se realizó con los datos observados de la estación hidrológica El Ángel, para lo cual se utilizó varios índices los cuales son ampliamente utilizados a nivel mundial (Gupta et al. 2009; Nash & Sutcliffe 1970; Akaike, 1974), esta fase permitió evaluar el funcionamiento del modelo se puede decir que si se representar razonablemente los procesos hídricos de la cuenca por lo cual existe un buen desempeño del modelo a nivel general

El análisis de vulnerabilidad del área de estudio considero dos tipos de indicadores los cuales fueron desarrollados por el IDEAM (IDEAM, 1999) en condiciones similares al ecosistema que se está estudiando, respecto al índice de aridez se establece que existe una época con déficit de agua que corresponde a las meses de junio – agosto mientras en el resto de meses existe excedentes de agua esta identificación se establece de acuerdo con la clasificación de índices de aridez establecida por la UNESCO (UNESCO, 1979), la cual fue validada por el programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 1997),

El índice de escasez a nivel de unidad hidrológica de respuesta indica que existe escasez hídrica entre los escenarios planteados de los años 2000 y 2014 que se encuentra directamente relacionados con el cambio de uso de suelo, lo cual afecta directamente a la capacidad de retención del suelo por el cambio de estructura y evapotranspiración por ende se ve reflejado en la reducción de caudales, además se debe mencionar que las características hidrológicas del páramo no podrán ser recuperadas debido a la alteración del área de paramo por el incremento de la actividad antrópica en la parte alta de la cuenca (Céleri & De Bievre, 2007) lo cual es también establecido en cuencas andina del Rio Limari (Espinosa, 2011).

4.1.3. Implicaciones en políticas públicas respecto a evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de la microcuenca del río Ángel.

A nivel nacional existe conflictividad por la disponibilidad del recurso hídrico de parte de los sectores demandantes que junto con la falta de políticas y la variabilidad del clima crea escenarios de tensión en la sociedad ya que se ven afectados por eventos extremos tanto de sequía como de inundaciones.

Ecuador presenta un importante proceso de cambio en el modelo que cumple en estado en su rol de gestión de los recursos hídricos por lo cual se designaron diferentes responsabilidades instituciones públicas que ejercen rectoría sobre el sector hídrico para una gestión integrada e integral con una visión ecosistémica y sustentable, a la par se han desarrollado a nivel de gobiernos autónomos descentralizados planes de desarrollo territorial que van alineados a los objetivos de plan nacional de buen vivir en sus objetivos estratégicos, lo cual ha creado todo un andamiaje para un adecuado uso de los recursos naturales que están en vigilancia de la nueva constitución de la república del año 2008.

En este ámbito la Secretaría Nacional del Agua dando cumplimiento a una de sus competencias formula el Plan Nacional del Agua que contiene trece líneas de acción, Una de estas líneas de acción está relacionada con el “Manejo de riesgos hídricos para la prevención de desastres” que es un ámbito transversal que interactúa con todos los factores del desarrollo por la implicación que estos eventos tienen en la calidad de vida, economía y soberanía alimentaria.

En este ámbito el Ministerio del Ambiente crea la Política de Ecosistemas Andinos del Ecuador que se encuentra alineado con la constitución de la república debido a que Ecuador se encuentra conformada en gran área por cadenas montañosas en las cuales se encuentran asentadas ciudades y presentan varios tipos de ecosistemas entre los que resalta los humedales y paramos que son la principal fuente de agua dulce para las ciudades de altura, esta política mencionada se focaliza en conservar y manejar de manera sustentable este tipo de ecosistemas mediante la aplicación de normas, que reduzcan la presión sobre la generación de ingresos que prestan estas áreas sea a nivel productivo o social.

A nivel general el estado garantiza el uso adecuado del recurso agua mediante un manejo sostenible del mismo, el problema principal radica en que no existen metodologías nacionales que investiguen la interacción de los sistemas antrópicos de altura con el ecosistema páramo, esto debido a la escasa información que existe a nivel nacional y la falta de recursos de parte del gobierno central, lo que hace más difícil, aplicar diferentes técnicas de monitoreo hidrológico, climático y estudios detallados de suelos, por esta razón se ha priorizado la preservación de estas áreas sin involucrar de una manera adecuada en la gestión de los servicios ecosistémicos que brinda.

Considerando la importancia que tiene el ecosistema páramo a nivel de Sudamérica (Colombia, Perú, Venezuela y Ecuador) como el principal generador de agua para las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan en ciudades de altura y ante la constante presión antrópica de la sociedad concernientes a las actividades agrícolas y pecuarias ocasionando un cambio abrupto del uso de suelos modificando las características hidrofísicas propias como su capacidad de almacenamiento y ser los reguladores del agua superficial disponible, se recomendaría una política a nivel de gobiernos locales sobre la dinámica hidrológica específica de cada sector que impulse la investigación como una herramienta básica de planificación y que ayude a la toma de decisiones con un adecuado manejo de los recursos naturales a nivel territorial asociados a estos ecosistemas, con el apoyo de los habitantes de estas áreas para que actúen como guardianes de estos sectores, una propuesta similar fue estipulada por la FAO pero con la finalidad de proteger el aporte hídrico en la parte bajas de las cuencas ante efectos del cambio climático (Policy Briefs on the management of natural resources and institutional strengthening for disaster risk reduction in the context of climate change TCP/RLA/3112, POLICY BRIEF 1. HYDROLOGICAL DYNAMICS OF SOUTH AMERICA)

Se propone la utilización de un modelo hidrológico como una herramienta para analizar escenarios de uso de suelo en la generación de resultados que sirvan para comprender los vínculos entre los procesos socioeconómicos y manejo de los recursos naturales lo cual ayudará a obtener alternativas para una adecuada gestión del agua con una adecuada toma de decisiones, planificación y gestión del recurso esto permitirá, la estimación de tendencias y cambios de uso del suelo y su afectación sobre el recurso hídrico, por lo anterior mediante

este proyecto se pretende generar una herramienta capaz de analizar el comportamiento de la cuenca bajo diferentes escenarios de cambio de uso de suelo, para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico e identificar la vulnerabilidad, con el propósito de sentar las bases sobre las cuales ordenar el territorio, lo que permitirá el uso adecuado de los recursos hídricos disponibles y la generación de acciones dirigidas al incremento de la productividad agrícola y ganadera bajo riego permanente sin afectar el ecosistema en el cual se encuentra la microcuenca del Río Ángel.

De continuar con la tendencia actual de la presión antrópica sobre este tipo de ecosistemas de altura y la reducción de caudales, será obligación forzada la introducción de medidas estructurales para mitigar el estado de la alta presión sobre las corrientes superficiales, como estrategia de desarrollo sostenible.

4.2. CONCLUSIONES

Dentro de este trabajo se consolidó y generó información de diferentes coberturas temáticas que no se disponía, los mismos que sirvieron como input's para la modelación hidrológica, con lo cual se pudo obtener un desempeño adecuado del modelo en la representación de los caudales medios mensuales en el periodo en estudio en la estación hidrológica de El Angel, lo cual permitió calibrar y validar el modelo con la aplicación de diferentes pruebas estadísticas de los caudales obtenidos, lo anterior satisface el objetivo uno del presente trabajo el cual menciona: Consolidar información correspondiente a suelos, permeabilidad de suelos, uso actual de suelos y escenarios de uso de suelo que permita analizar el balance hídrico de la microcuenca del río El Ángel.

En lo concerniente a la generación de escenarios de uso de suelo para evaluar vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río El Ángel, el escenario de uso de suelo se tomó como base el año 2000 debido a que existía información elaborada por el SIGAGRO, mientras que el escenario para el año 2014 se generó en base a la interpretación de imágenes satelitales con lo cual se pudo establecer las diferencias de cobertura de suelos en este periodo, con la ayuda del modelo calibrado y validado se pudo identificar la influencia del cambio de uso de suelos en

los caudales medios mensuales, se debe mencionar que el régimen hídrico se mantiene estable cuando no se altera las condiciones de uso de suelo esto quiere decir que no existe déficit de agua lo cual se pudo evaluar mediante la aplicación del índice de aridez y el índice de escasez en el área donde el predominio de uso de suelo es el páramo, de acuerdo a los resultados obtenidos se satisface el segundo objetivo específico que menciona Evaluar la vulnerabilidad hidrológica de la microcuenca del río Ángel frente a escenarios de cambio de uso de suelo.

La generación de metodologías con la aplicación de herramientas que permitan evaluar la vulnerabilidad hídrica frente a actividades antrópicas en ecosistemas de altura, no se encuentran dentro de la normativa ecuatoriana vigente, sin desmerecer el avance que existe en la actualidad en la protección de estas áreas, así como la vigilancia en el interactuar de la sociedad en la presión que puede ejercer para obtener recursos económicos ligados a producción en estas áreas, es por esto que se necesita una política que vincule y articule de una manera adecuada la investigación de los ecosistemas de altura frente a las actividades antrópicas lo que permitirá el ordenamiento del territorio para una adecuada gestión de los recursos, lo anterior cumple con el tercer objetivo planteado que persigue analizar las implicaciones en políticas públicas respecto a evaluación de la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca del río Ángel.

En lo que se refiere al objetivo general de esta investigación se puede estipular que se cumplió a cabalidad ya que se generó una metodología capaz de evaluar la vulnerabilidad hídrica de la microcuenca del Río Ángel frente a actividades antrópicas.

De acuerdo a la hipótesis planteada que menciona: el cambio de uso de suelo en una microcuenca de páramo debido a actividades antrópicas, tendrá un impacto significativo en la vulnerabilidad hídrica, es aceptada debido a los resultados obtenidos tanto en el balance hídrico así como en los indicadores que permitieron cuantificar la vulnerabilidad de la microcuenca.

4.3 FUTURAS INVESTIGACIONES

El presente trabajo de investigación debe ser considerado como la línea base para cuantificar la vulnerabilidad de cuencas hídricas en ecosistemas de altura en especial en áreas donde existe presión antrópica sobre los páramos por avance de la frontera agrícola teniendo en cuenta que estas áreas son las proveedoras del recurso hídrico en ciudades de altura, a continuación se presenta una breve reseña sobre posibles temas de investigación que iniciarían a partir de esta tesis.

- Investigar sobre la oferta y demanda del recurso hídrico enfocado a otros sectores socioeconómicos lo cual servirá para conocer más sobre el conflicto ocasionado en este ecosistema y la presión que ejerce las actividades productivas, lo que permitirá el fortalecimiento de la gestión integral de los recursos hídricos no solo en las estrategias de protección de la oferta hídrica, monitoreo u otro tipo de seguimiento del recurso sino en la reducción de la demanda de agua.
- Investigar sobre los efectos que tienen las actividades antrópicas sobre la calidad de las aguas superficiales debido a que al incrementar el uso consuntivo de agua en actividades productivas provoca inmediatamente el aumento de las tasas de vertimientos de aguas negras y grises lo cual relaciona el aumento de contaminantes, lo cual demandaría a establecer estándares de niveles críticos para el uso de agua para consumo humano así como establecer restricciones en la calidad para actividades productivas.

4.4. REFERENCIAS

- Guatibonza. M., Álvarez. H., Javier. G., & Sanabria. J. 2009. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita. Universidad Nacional de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 27, 261-271.
- Guatibonza. M., Álvarez. J., Sanabria. J., 2009. Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita, 27 (2), 261-271
- Reynolds. W.D., Elrick, D.E., Young, E.G., Amoozegar, A., Booltink, H.W.G., Bouma, J., 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: Dane, J.H., Topp, G.C.(Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, pp. 797–878.
- Gupta. S., & Larzon. W., 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research* 15(6): 1633- 1635.
- NASH. J., & SUTCLIFFE., 1970 River flow forecasting through conceptual models, part 1a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3): 282-290.
- Akaike. H., 1974. A new look at the statistical model identification IEEE. *Transactions on Automotive Control*. 19, 716-723.
- UNESCO., 1979. Map of the world distribution of arid regions: Explanatory note. Paris: UNESCO.
- Espinosa. J., Hamil, U., Arumí, J., Rivera, D., & Stehr. A. 2011. Evaluación de la vulnerabilidad climática de la cuenca del río Limarí usando un modelo semidistribuido SWAT. *Gestión Ambiental*, 22, 13-30.