



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**“DESARROLLO DE UN MODELO DE BALANCE HÍDRICO DE LA LAGUNA DE LIMONCOCHA”**

**Realizado por:**

Mireya Anabell Mosquera Andrade

**Director del proyecto:**

Ing. Fabio Villalba MSc.

**Como requisito para la obtención del título de:**

**INGENIERA AMBIENTAL**

**Quito- Ecuador**

**2014**

## DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, MIREYA ANABELL MOSQUERA ANDRADE, con cédula de identidad # 171488442-4, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes de este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

MIREYA ANABELL MOSQUERA ANDRADE

C.C.: 171488442-4

## **DECLARATORIA**

El presente trabajo de investigación titulado:  
**“DESARROLLO DE UN MODELO DE BALANCE HÍDRICO DE LA  
LAGUNA DE LIMONCOCHA”**

Realizado por:  
**MIREYA ANABELL MOSQUERA ANDRADE**  
como Requisito para la Obtención del Título de:  
**INGENIERA AMBIENTAL**

ha Sido dirigido por el profesor  
**Ing. Fabio Villalba MSc.**  
quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

**Ing. Fabio Villalba MSc.**  
**DIRECTOR**

## DEDICATORIA

A mi hijo Mario Emilio que me impulsó siempre a ser mejor, su amor me fortaleció día a día y me llevó a cumplir mis más grandes retos y metas.

A él, mi bendición y tesoro más grande.

Te Amo demasiado hijo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Julio Mosquera y Rocío Andrade, quienes con su infinito amor y comprensión me apoyaron en toda mi carrera y no permitieron que me rindiera. Por todo el esfuerzo que realizaron para que hoy en día pueda ser una profesional de la República del Ecuador.

A mis hermanos que supieron apoyarme de una u otra forma, a mi familia en general especialmente a mi abuelita quien estuvo en momentos difíciles y supo darme una mano.

Al padre de mi hijo, Mario Borja quien con su amor, apoyo y sus palabras de aliento me llevaron a soñar lejos, gracias por regalarme mi mayor fortaleza.

Al Ing. Fabio Villalba, el director de la presente investigación por haber depositado su confianza en mí para la realización de la misma, por todo el apoyo, consejos, sugerencias acertadas que me brindó y por haber comprendido cuánto significaba para mí culminar mi carrera profesional.

Al Ing. Alonso Moreta y al Dr. Carlos Ordoñez, miembros del tribunal, por todo el conocimiento impartido y por la motivación que me dieron para culminar mi propósito.

A la Ing. Katty Coral, decana de la Facultad de Ciencias Ambientales, quien fue soporte y amiga, por todo el conocimiento brindado en mi vida universitaria que es sin duda un tesoro muy preciado.

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Internacional SEK, mi segundo hogar que además de haber aprendido día a día con calidad por sus profesores de excelencia, me dejó amistades incondicionales.

## INDICE GENERAL

CONTENIDO	PAGINA
Portada.....	i
Declaración juramentada de autores.....	ii
Declaración firmada Director y lectores.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice general de contenidos.....	vi
Índice de tablas y figuras.....	viii
Resumen.....	1
Abstract.....	2
CAPITULO I	
Introducción.....	3
1.1 Problema a investigar.....	5
1.1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.1.2 Diagnóstico del problema.....	5
1.1.3 Pronóstico.....	6
1.1.4 Control del Pronóstico.....	6
1.1.5 Formulación del Problema.....	6
1.1.6 Sistematización del Problema.....	6
1.1.7 Objetivo General.....	7
1.1.8 Objetivos Específicos.....	7
1.1.9 Justificaciones.....	7
1.2 Marco Teórico.....	8

1.2.1 Estado actual del conocimiento.....	8
1.2.2 Adopción de una perspectiva teórica.....	14
1.2.3 Marco conceptual.....	14
1.2.4 Hipótesis.....	17
1.2.5 Identificación y caracterización de variables.....	17
CAPITULO II: METODOLOGÍA	
2.1 Tipo de estudio.....	18
2.2 Modalidad de la Investigación.....	18
2.3 Método.....	19
2.4 Población y muestra.....	19
2.5 Instrumentos de Investigación.....	19
2.5.1 Ajustes de Ecuación .....	19
2.5.2 Recolección de datos.....	21
2.6 Validez y confiabilidad de los instrumentos.....	29
2.7 Procesamiento de Datos.....	29
CAPITULO III: RESULTADOS	
3.1 Levantamiento de Datos.....	38
3.2 Presentación y análisis de resultados.....	38
CAPITULO IV: DISCUSIÓN	
4.1 Aplicación Práctica.....	42
4.2 Conclusiones.....	42
4.3 Recomendaciones.....	43

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### TABLAS

CONTENIDO	PAGINA
<b>Tabla 1:</b> Variación del nivel de la laguna con respecto al muelle 2012 .....	23
<b>Tabla 2:</b> Precipitación mensual del período Enero-Junio del 2012.....	23
<b>Tabla 3:</b> Coeficiente de Escorrentía .....	26
<b>Tabla 4:</b> Precipitación máxima en 24 horas.....	26
<b>Tabla 5:</b> Número Máximo de horas de sol .....	28
<b>Tabla 6:</b> Cálculo de volumen de almacenamiento al comienzo y final del período.....	29
<b>Tabla 7:</b> Cálculo de promedio de precipitación.....	30
<b>Tabla 8:</b> Cálculo de promedio de precipitación por período .....	30
<b>Tabla 9:</b> Cálculo de promedio de precipitación máxima.....	32
<b>Tabla 10:</b> Cálculo de intensidad de la precipitación.....	32
<b>Tabla 11:</b> Cálculo de escorrentía.....	33
<b>Tabla 12:</b> Caudal evacuado por el caño de la laguna de Limoncocha.....	33
<b>Tabla 13:</b> Cálculo de promedios de temperatura.....	34
<b>Tabla 14:</b> Cálculo de índice de calor mensual .....	34
<b>Tabla 15:</b> Cálculo de evapotranspiración potencial sin corregir .....	35
<b>Tabla 16:</b> Cálculo de evapotranspiración potencial corregida .....	36
<b>Tabla 17:</b> Cálculo de evapotranspiración potencial. ....	36
<b>Tabla 18:</b> Cálculo de volumen aportado por flujo subterráneo .....	37

<b>Tabla 19:</b> Resultados del balance hídrico de la laguna de Limoncocha desconociendo el volumen aportado por el flujo subterráneo.....	39
--	----

<b>Tabla 20:</b> Tabla de resultados del balance hídrico de la laguna de Limoncocha.....	40
--	----

## FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Modelo Conceptual del Sistema Hídrico de la Reserva Biológica .....	4
--	---

<b>Figura 2:</b> Humedal, laguna de Limoncocha.....	9
---	---

<b>Figura 3:</b> Zona inundada al sur de la laguna de Limoncocha. ....	10
--	----

<b>Figura 4.</b> Relaciones isotópicas entre la laguna Limoncocha, el río Napo y la precipitación pluvial .....	12
---	----

<b>Figura 5:</b> Sistema Hídrico RBL .....	13
--	----

<b>Figura 6:</b> Curva profundidad-Volumen Laguna de Limoncocha.....	22
--	----

<b>Figura 7:</b> Mapa Batimétrico.....	22
--	----

<b>Figura 8:</b> Zona de estudio para cálculo de áreas.....	24
---	----

## RESUMEN

La laguna Limoncocha se halla ubicada en la Amazonía ecuatoriana al norte del río Napo, en la Reserva Biológica Limoncocha (RBL). Está incluida, en el marco de la convención RAMSAR, como un humedal continental con categoría "O". El presente trabajo aborda la propuesta en primera instancia de un modelo de balance hídrico de la laguna de Limoncocha basado en un modelo de balance hídrico que se propuso en Colombia, debido a sus similitudes de ecosistema. El modelo de balance hídrico de la laguna de Limoncocha se realizó a partir de un modelo conceptual en el cual se considera que el flujo subterráneo podría ser uno de los aportes importantes. El modelo se corrió en base a un limitado conjunto de datos de parámetros específicos medidos en el área, y estimación de otros, dando como resultado un balance coherente en el que se confirmó que el flujo subterráneo debe ser incorporado al momento de realizar el balance hídrico. Se concluyó que el modelo es viable, pero tendrá que ser ratificado o modificado solamente cuando se disponga a futuro de una base de datos sólida, resultante de un monitoreo de los parámetros de interés en la laguna y zonas aledañas, a lo largo de un intervalo de tiempo de varios años.

**Palabras Claves:** Modelo, Balance Hídrico, laguna de Limoncocha.

## **ABSTRACT**

The lake Limoncocha is located in Ecuadorian Amazon in north of the Napo River, in Limoncocha Biological Reserve (LBR). It is included as part of the RAMSAR convention, as a continental wetland category "O". This paper deals with the proposal in the first instance of a water balance model of the lake Limoncocha based on a water balance model that was proposed in Colombia, due to their similarities as ecosystem. The water balance model of Lake Limoncocha was performed from a conceptual model where groundwater flow could be one of the important contributions. The model was run based on a limited data of specific parameters measured in the area, and estimation of others, resulting in a consistent balance in which it was confirmed that the groundwater flow should be incorporated at the time of the water balance. It was concluded that the model is feasible, but will have to be ratified or modified only when available future solid data base resulting from monitoring of the parameters of interest in the lake and surrounding areas, over a range of time of several years.

**Keywords:** Model, Water Balance, Limoncocha lagoon.

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas complejos con dependencia de regímenes acuáticos naturales dulces, donde el nivel de agua no exceda los seis metros (Bravo y Windevoxhel, 1997). Siendo un elemento vital entre los ecosistemas con los que cuenta el Ecuador, ya que éstos ofrecen servicios ambientales como el control de la erosión e inundaciones, la producción de recursos pesqueros, y como atractivo turístico (Ramsar Convention Secretariat, 2004). Cabe recalcar que los humedales realizan funciones importantes en el ciclo hidrológico, tales como mitigación de impactos, retención de sedimentos y recarga de acuíferos. Probablemente la hidrología sea el determinante más importante para el establecimiento y mantenimiento de tipos específicos de humedales y sus procesos (Hawk et al. 1999).

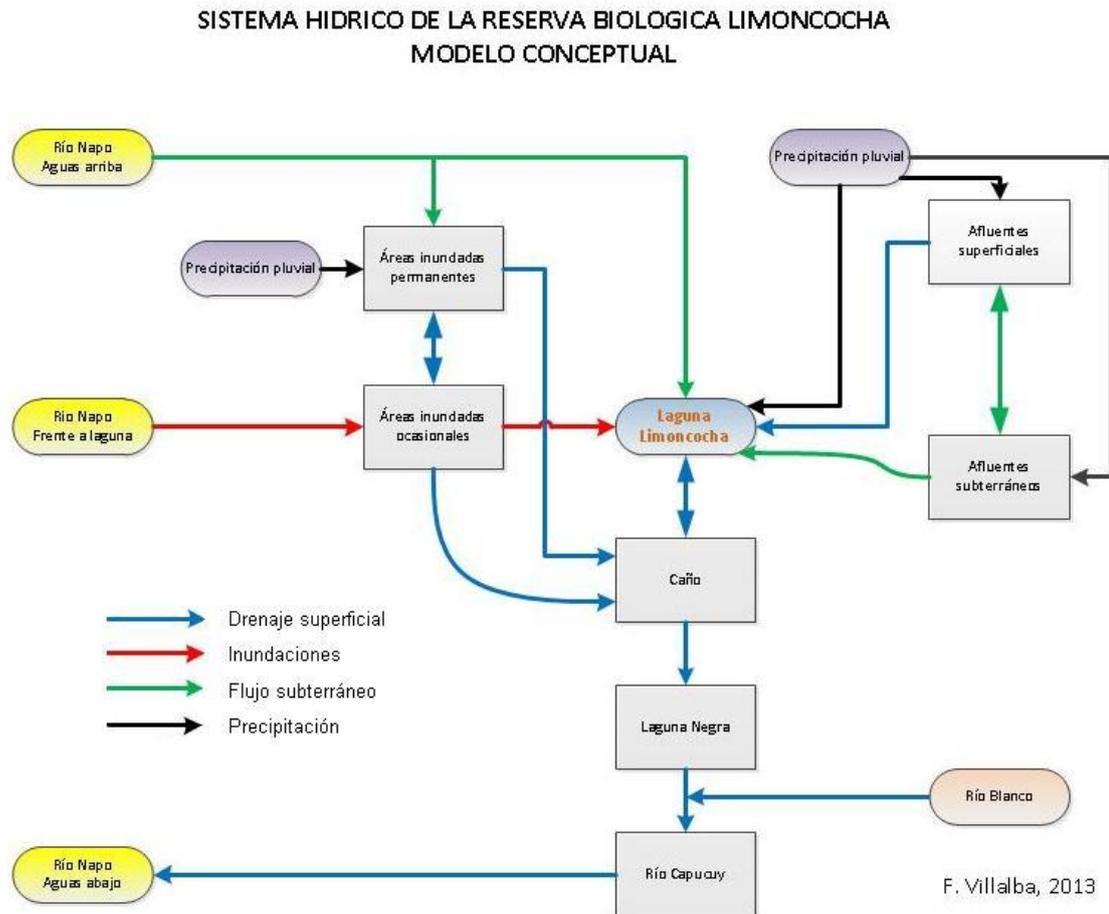
La Reserva Biológica Limoncocha (RBL), declarada como tal en el año de 1985, mediante acuerdo ministerial No. 394, publicado en el Registro Oficial No. 283, está integrada principalmente por la laguna de Limoncocha (antiguamente llamada Capucuy), las zonas aledañas, y la Laguna Negra o también conocida como Yanacocha. El 100% del área corresponde a un Humedal Ramsar, denominación obtenida en julio de 1998. (ECOLAP y MAE, 2007).

La laguna es alimentada por los ríos Pishira y Playayacu y por algunas vertientes en su costado noroccidental. La salida de la laguna se da a través del denominado “Caño” en su extremo nororiental, el cual conduce el agua hacia la laguna Negra, la cual descarga a su vez hacia el río Blanco, el cual confluye con el río Capucuy, que desemboca en el Napo; de acuerdo a trabajos previos, se presume que la laguna tiene relación con el Rio Napo por una posible vía más directa que los ríos mencionados. (Villalba, F. y Revelo, G. en preparación).

Comprobaciones de campo realizadas a lo largo del tiempo, han permitido verificar que el caudal del Caño, efluente de la laguna de Limoncocha, supera a la sumatoria de caudales de los ríos Playayacu, Pishira y los demás aportes conocidos, por lo que se tiene que asumir que existe un importante

aporte de agua a la laguna que podría ser subterráneo o a través de un aporte superficial no conocido (Villalba, F. y Revelo, G. en preparación).

Se ha realizado un modelo conceptual del sistema hidrológico de la laguna (F. Villalba, comunicación personal) donde claramente se determinan entradas y salidas, y a partir de éste se quiere plantear un modelo matemático del balance hídrico.



**Figura 1:** Modelo Conceptual del Sistema Hídrico de la Reserva Biológica Limoncocha. F. Villalba, 2013.

## **1.1. El problema de investigación**

### **1.1.1. Planteamiento del problema**

La laguna de Limoncocha es considerada como el elemento hídrico más importante en el sistema hídrico de la Reserva Biológica Limoncocha, por lo cual se requiere de una debida gestión en su conservación, más aún si se considera que el cambio climático se muestra más agresivo cada día que pasa, y sus efectos se pueden percibir en diferentes partes del mundo. No sería improbable que se produzca una modificación de las condiciones hidrológicas a gran escala en algunos años, de acuerdo a varias previsiones disponibles, y que cuerpos de agua como los de la RBL puedan ser afectados.

Dicho esto, la necesidad de determinar en términos cuantitativos las relaciones que tienen los diferentes cuerpos de agua con respecto a la laguna mencionada para entender apropiadamente el funcionamiento del sistema hídrico de la RBL es crucial, ya que lo planteado en este trabajo puede constituir una base para predecir impactos negativos tanto como positivos resultantes del cambio climático y así poder tomar las medidas adecuadas para contrarrestar posibles consecuencias perjudiciales.

### **1.1.2. Diagnóstico del problema**

No existe un modelo matemático del balance hídrico de la laguna de Limoncocha que permita visualizar de manera cuantitativa el aporte y la interrelación de los diferentes cuerpos de agua con la laguna Limoncocha, ya que hasta el momento solamente se ha desarrollado un modelo conceptual.

Entender las relaciones existentes entre los diferentes componentes que integran el sistema hídrico de la RBL ayudará a futuro a plantear medidas de manejo y/o conservación más realistas tendientes a la sostenibilidad del ecosistema.

### **1.1.3. Pronóstico**

La falta de información respecto a algunos de los parámetros requeridos para el modelo matemático (ecuación) obligará a asumir algunos datos siempre y cuando se tenga información para fundamentar lo que se asume. El resultado final permitirá conocer, con un margen de incertidumbre, una primera aproximación al balance hídrico de la laguna de Limoncocha.

### **1.1.4. Control de pronóstico**

El modelo tendrá que ser validado y ajustado a futuro con datos de monitoreo permanentes de la laguna, así se permitirá solucionar en gran parte el problema actual de falta de información verificable respecto a algunos de los parámetros.

### **1.1.5. Formulación del problema**

¿Cuál es el aporte de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos y del río Napo a la laguna Limoncocha?

### **1.1.6. Sistematización del problema**

¿Cuáles son los aportes de los cuerpos de agua?

¿Qué relación tiene el nivel de la laguna de Limoncocha con el aporte de las diferentes entradas y salidas de agua?

¿Qué relación tiene el nivel de la laguna de Limoncocha con el río Napo?

¿Qué relación tiene el nivel de la laguna de Limoncocha con la precipitación?

¿Qué relación tiene el nivel de la laguna de Limoncocha con la evapotranspiración?

¿Qué relación tiene el nivel de la laguna de Limoncocha con los flujos subterráneos?

#### 1.1.7. Objetivo general

- El Objetivo General del presente proyecto es desarrollar un modelo matemático de balance hídrico de la laguna de Limoncocha, tomando como punto de partida un modelo desarrollado en Colombia para un cuerpo de agua “Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo” por Molina, N. Piza, C. y Wills, A. (2007).

#### 1.1.8. Objetivos específicos

- Parametrizar el modelo conceptual previamente desarrollado.
- Asignar los valores a los parámetros en función de la información disponible.
- Desarrollar el modelo con los componentes de precipitación, flujo superficial y subterráneo, y evapotranspiración.

#### 1.1.9. Justificaciones

**Teórica:** La presente investigación tiene como meta realizar el modelo que puede ser usado con la finalidad de brindar conocimiento del comportamiento hídrico de la laguna de Limoncocha a quien quiera hacer uso del mismo.

**Metodológica:** El procedimiento para desarrollar este modelo ayudaría a la comprensión o entendimiento del comportamiento de otros cuerpos de agua sobre todo en la región amazónica.

**Práctica:** El modelo aportará en la conservación del sistema hídrico de la laguna de Limoncocha y de la Reserva Biológica Limoncocha.

**Relevancia social:** El modelo hídrico ayudará a la conservación del ecosistema de la RBL, así básicamente si se conserva la reserva se

contribuirá al mantenimiento de la cultura, al turismo y al bienestar de la comunidad de Limoncocha.

El estudio no produjo impactos ambientales o socio-económicos visibles y sus resultados servirán para futuras investigaciones.

## **1.2.Marco teórico**

### **1.2.1. Estado actual del conocimiento sobre el tema**

En el sistema hídrico de Limoncocha, no se ha desarrollado un modelo matemático, por lo cual se han buscado experiencias que tengan puntos de contacto con la situación de la RBL. Una caso de interés es un estudio desarrollado en Colombia, “Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo” trabajo realizado por Molina, N. Piza, C. y Wills, A. (2007) que tiene con el caso de Limoncocha, aspectos comunes o similares como los siguientes:

- Existe en Colombia y en algunos países tropicales el concepto *ciénaga* que se refiere a las lagunas que se han formado en las partes bajas de los ríos por procesos de inundación de llanuras (Roldán, 2008), éste es el caso, en el trabajo de Colombia de la ciénaga Cachimbero que se considera un humedal. Cowardin et al. (1979) considera que los humedales comprenden áreas de marismas, pantanos, turberas, aguas naturales o artificiales, estancadas o en movimiento, sean dulces, salobres o saladas. Se incluyen dentro de los humedales los ambientes acuáticos cuya profundidad no exceda los seis metros; concepto que se ajusta a la laguna de Limoncocha.



**Figura 2:** Humedal, laguna de Limoncocha. (Fotografía F. Villalba, 2012).

- Se considera que la laguna de Limoncocha es un antiguo meandro del río Napo inundado (WALSH, 2003)
- Las dos tienen situaciones similares en cuanto a su clima y naturaleza de ecosistema.
- 
- La ciénaga se encuentra ubicada en una zona que está dentro del área de inundación de un río importante donde el terreno sería similar a la de la RLB.
- El herbazal, en el caso de Cachimbero, se equipara a la zona inundable, en el caso de Limoncocha.



**Figura 3:** Zona inundada al sur de la laguna de Limoncocha. (F. Villalba, 2013).

El trabajo colombiano se realizó teniendo en cuenta las características particulares de cada una de las unidades hidrológicas del ecosistema, el almacenamiento de la ciénaga al comienzo y al final del período, la precipitación, escorrentía, evapotranspiración, caudal del caño y las áreas de la ciénaga, espejo de agua, herbazal y la cuenca drenante, respectivamente. Estos mismos atributos pueden ser identificados y valorados para el caso de Limoncocha, y deberán ser ajustados al modelo conforme se propone en el presente trabajo.

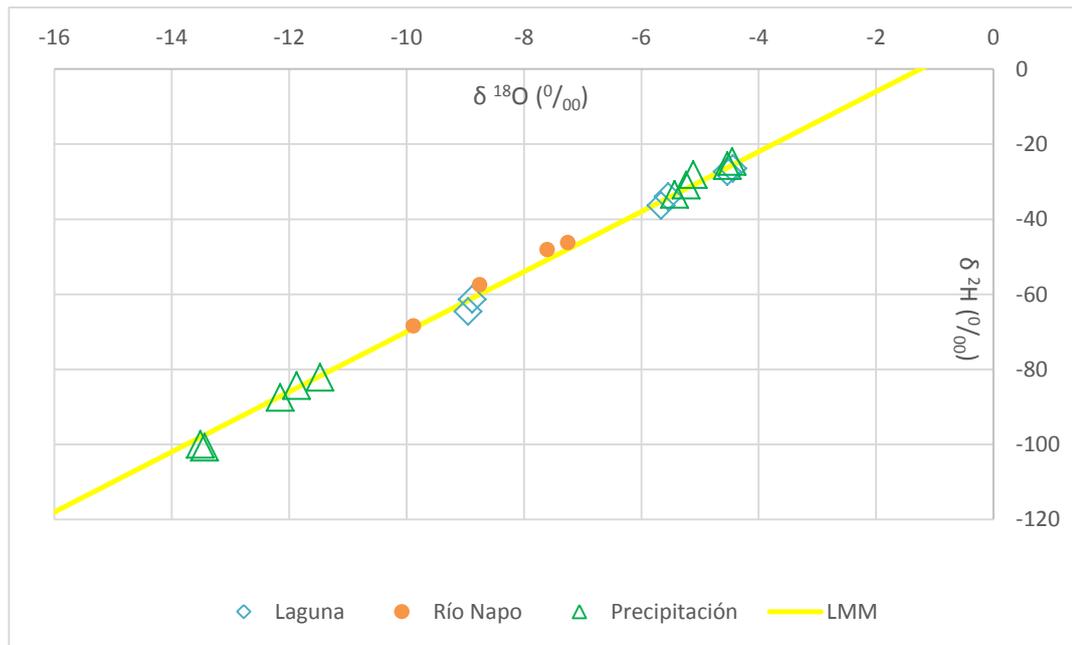
La investigación realizada en la ciénaga de Cachimbero fue sistematizada con la siguiente ecuación:

$$V_{i+1}=V_i+P\frac{Ac_{i+1}+Ac_i}{2}+Esc\frac{Ad_{i+1}+Ad_i}{2}-\frac{Qc_{i+1}+Qc_i}{2}-(ETP_{esp} * Aesp)-ETP_{her}\frac{Aher_{i+1}+Aher_i}{2} \quad (1)$$

Este modelo ha sido aplicado para un periodo de tiempo de 10 años (1994 a 2004) y en el caso colombiano no se tomaron en cuenta flujos subterráneos ya que se consideró que este componente no tiene gran influencia en los resultados del balance hídrico; esto plantea una diferencia para el caso de Limoncocha, en donde se considera que dichos flujos si tienen importancia.

El presente trabajo se basará en información obtenida en trabajos previos (proyectos de fin de carrera y tesis) realizados en la Universidad Internacional SEK, particularmente los siguientes: “Caracterización geoquímica de sedimentos de la Laguna Limoncocha” de Ordoñez, C. (2013); “Caracterización Físicoquímicas y microbiológicas de muestras de agua del sistema hídrico de la Reserva Biológica de Limoncocha” de Rodríguez, L. (2012); “Muestreo y determinación de variaciones físicas en la Laguna de Limoncocha” de Revelo, G. (2012).

Adicionalmente, investigaciones realizadas en Limoncocha utilizando la técnica de los isótopos estables  $^{18}\text{O}$  y Deuterio ( $^2\text{H}$ ), han aportado datos de interés respecto a las relaciones entre la laguna de Limoncocha, la precipitación pluvial y el río Napo. Datos recolectados en los años 2011 y 2012, muestran (figura 4) que en una época del año, la composición isotópica de la laguna es semejante a la del río Napo, en tanto que en otra época, su composición se acerca más a la de la precipitación pluvial. Esto sugiere que el comportamiento de los aportes de agua a la laguna no es constante a lo largo del tiempo, existiendo seguramente una interrelación – superficial o subsuperficial- más directa con el río Napo en el primer caso, en tanto que en el segundo caso el aporte del río Napo disminuye su importancia y es reemplazado por aportes originados en la lluvia, probablemente tanto por vía escorrentía como por flujos subterráneos provenientes del costado NO de la laguna. (F. Villalba, Comunicación personal, 2014).

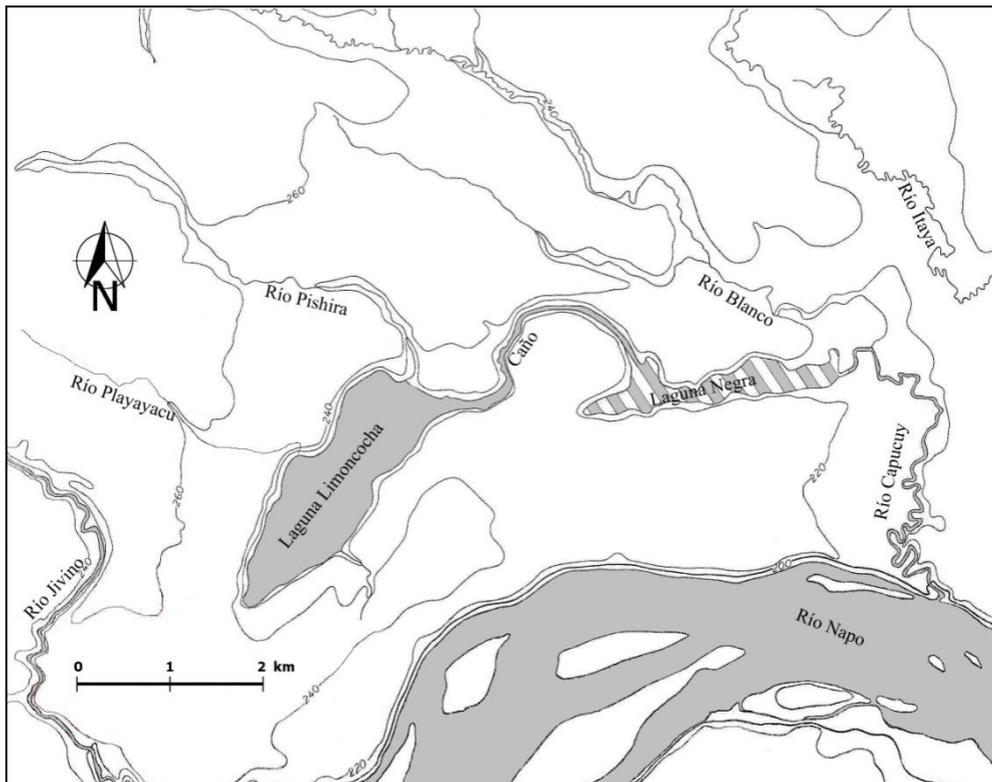


**Figura 4.** Relaciones isotópicas entre la laguna Limoncocha, el río Napo y la precipitación pluvial (F. Villalba, Comunicación personal, 2014)

## Área de estudio

### Ubicación y Sistema hídrico de la Reserva Biológica Limoncocha

La laguna de Limoncocha se encuentra ubicada al norte del río Napo, a una distancia de entre 1.5 y 2 kilómetros respecto a la margen del río, en la Reserva Biológica Limoncocha (RBL), provincia de Sucumbíos, se halla dentro de la cuenca del río Capucuy, cuyos tributarios más importantes son los ríos Playayacu, Pishira, y Blanco los cuales conforman su sistema hídrico (Figura 5).



**Figura 5:** Sistema Hídrico RBL (Villalba, F. y Revelo G. En preparación).

La laguna está incluida, en el marco de la convención RAMSAR, dentro del grupo de humedales continentales con categoría “O” (lagos permanentes de agua dulce, de más de 8 ha, incluye meandros o brazos muertos de río (RAMSAR, 1999).

**Clima**

La humedad relativa supera el 80%, la mayor parte del tiempo. La temperatura ambiental promedio es de 25 °C, con una precipitación anual de aproximadamente 3200 mm (ECOLAP y MAE, 2007).

**Dimensiones de la laguna**

El punto más profundo de la laguna de Limoncocha alcanza los 3,10 metros, con un promedio de 1,80 metros. Posee una longitud máxima de 3 kilómetros, y se registra una superficie de 213 Ha. (Villalba, F. y Revelo G. En preparación).

## 1.2.2. Adopción de una perspectiva teórica

El balance hídrico planteado en el trabajo “Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo” Molina, N. Piza, C. y Wills, A. (2007) enfrenta un caso parecido al de la RBL y contiene elementos similares a los que componen el sistema hídrico de la RBL, por lo tanto, se adoptará para este trabajo el enfoque desarrollado por ellos, como punto de partida y se intentará ajustar este modelo, con algunas asunciones, al caso de Limoncocha.

## 1.2.3. Marco conceptual

### ❖ **Limnología**

#### ▪ **Definición**

En la década de los cuarenta la limnología era considerada como la ciencia encargada de estudiar las interrelaciones de procesos y métodos debidas a las transformaciones continuas de masa y energía en el agua. Sin embargo, no es coherente referirse solamente a los cambios físicos dentro de un ecosistema, razón por la cual la definición es perfeccionada en los 80's como la relación funcional y productiva de las comunidades del ecosistema acuático, y la afectación que producen los parámetros físicos, químicos y biológicos sobre la misma (Roldán, 2008).

#### ▪ **Laguna**

Una laguna está definida como un cuerpo de agua léntico, rodeado de tierra por todas partes, del cual su cuenco es el resultado de distintos procesos geológicos (Cole, 1988).

Esta extensión de agua es considerada como un sistema abierto, debido a la constante interacción con su entorno, desde su cuenca de drenaje hasta el intercambio con la atmósfera (Roldán, 2008).

- **Río**

Son considerados como ecosistemas acuáticos de aguas lóxicas de flujo unidireccional (Cole, 1988).

- **Vertiente**

Puntos superficiales por los cuales emana agua subterránea. El flujo de estas están condicionados por factores como: precipitaciones, capacidad de infiltración del suelo, conformación del acuífero, etc. (Ayala, 2003).

- ❖ **Balance Hídrico**

Un balance hídrico analiza la entrada y salida de agua en un sector de una cuenca a lo largo del tiempo, tomando en consideración los cambios en el almacenamiento interno bajo diferentes escenarios (UNOPS-PNUMA, 2013)

El balance de agua es la confrontación del activo y del pasivo para averiguar el superávit o déficit de agua durante un cierto periodo. El activo es la precipitación y el pasivo el gasto de agua (Ledesma, 2011). Por otro lado el balance hídrico es más complicado ya que depende de otros varios factores como los cuerpos de agua superficial y subterráneo, precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía.

- **Flujo Superficial:** es el caudal de agua por la superficie del terreno y que puntualmente forma arroyos. Se incluyen los flujos subsuperficiales cuando no se puede separar el flujo superficial para hacer el análisis hidrológico. La escorrentía superficial directa alcanza la salida de la cuenca poco después de que la lluvia comience. Su volumen es igual al exceso de lluvia. (UNESCO-WHO, 1998).
- **Flujo Subterráneo:** Es el agua que se desplaza por acción de la gravedad en el interior del suelo y ocupa el espacio poroso de las rocas que constituyen la corteza. Cuando en su movimiento descendente, alcanza un sustrato impermeable o una zona saturada, satura a su vez completamente la zona suprayacente y constituye el agua subterránea propiamente dicha. Las aguas subterráneas son las que se encuentran bajo la superficie del terreno o dentro de los poros o fracturas de las

rocas en zonas húmedas a metros de profundidad (Duque-Escobar, 2003).

- **Aguas de precipitación**

Las aguas de precipitación debidas al ciclo hídrico, se originan principalmente en la evaporación a partir de la superficie de los mares, que poseen 365 millones de km<sup>3</sup> de agua y cubren el 73% de la superficie de la Tierra. El aporte calorífico de la radiación solar permite convertir en vapor de dos a tres litros de agua por metro cuadrado y por día. (Duque-Escobar, 2003).

- **Evapotranspiración**

Se define la evapotranspiración como la pérdida de humedad de una superficie del suelo por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo (Caro, 2011)

- **Evapotranspiración Potencial (ETP)**

Thornthwaite (1948) denominó Evapotranspiración Potencial (ETP) a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en óptimas condiciones. Se expresa en mm.

- **Temperatura**

Se determina mediante la cantidad de energía calórica que un cuerpo de agua está en capacidad de absorber. La cantidad de energía calórica absorbida por un cuerpo de agua, resulta sumamente importante dentro de los procesos biológicos que suceden dentro del mismo, como también para las especies que habitan ahí (Roldán, 2008).

- **Caudal**

Se refiere a la cantidad de fluido transportado a través de un área específica en un periodo de tiempo determinado (Bello, 2000).

- ❖ **Modelo Matemático:** En ciencias aplicadas un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos y se basa en expresar utilizando

los instrumentos de la teoría matemática, declaraciones, relaciones, proposiciones sustantivas de hechos o de contenidos simbólicos: están implicadas variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad (Rengifo, 2008).

- ❖ **Hidrología isotópica:** utilización de pequeños cambios en la abundancia relativa de especies isotópicas, cuantificando una variación  $\delta$  respecto a un estandar conocido, que se aplica como un trazador natural del origen de cuerpos de agua. (Hiscock, K, Bense, V., 2014)

#### 1.2.4. Hipótesis

Al ser una investigación de tipo exploratoria y correlacional, no es necesaria la formulación de una hipótesis.

#### 1.2.5. Identificación y caracterización de variables

**Variables de entrada:** precipitación, flujos superficiales y subterráneos, evapotranspiración.

**Variable de salida:** volumen de agua acumulado en la laguna.

- **Variable independiente:** Entradas.
- **Variable dependiente:** Salidas.

## CAPITULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1 Nivel de estudio.

Fundamentalmente se trata de un estudio de carácter **exploratorio** ya que se buscará esclarecer el problema planteado de una manera secuencial, partiendo de revisiones bibliográficas e investigaciones de campo realizadas en años anteriores en la facultad de Ciencias Ambientales de la UISEK, así también como tesis realizadas en la Reserva Biológica Limoncocha. Se utilizarán valores medidos en monitoreos periódicos realizados en la laguna, se estimarán valores del flujo subterráneo en base a información litológica obtenida de pozos perforados cerca del área.

Esta investigación es también de tipo **correlacional** ya que se intenta llegar a un balance de masas en el sistema hidrológico de la RBL mediante la posible interacción de varios parámetros medidos y estimados en el área.

#### 2.2 modalidad de investigación

La investigación es básicamente **documental** debido a que se amplía y se profundiza el conocimiento con apoyo predominante de información obtenida de registros impresos, los cuales son tesis previamente realizadas para recolectar los datos que sean necesarios para el modelamiento, así también se basará en la metodología que consta en el trabajo “Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero” (2007), implementando un modelo de balances de flujo”, y otras publicaciones que tienen puntos de contacto con el tema balances hídricos y modelación ambiental.

## 2.3 Método

La investigación aplica el método **inductivo- deductivo**, en razón de que se intenta, partiendo de un modelo desarrollado para ciénagas, aplicarlo al caso particular de la laguna de Limoncocha, con el fin de ajustar el modelo de balance hídrico de la laguna. De este modelo se podrán inferir aplicaciones generales a otros cuerpos de agua en la Amazonía Ecuatoriana.

## 2.4 Población y muestra

El trabajo engloba a todos los cuerpos de agua del sistema hídrico que es la base de la Reserva Biológica Limoncocha, e incluye la Laguna de Limoncocha, los ríos Napo, Pishira, Playayacu y Capucuy, las precipitaciones y la evapotranspiración, así como cuerpos hídricos subterráneos.

## 2.5 Instrumentos de investigación

La investigación se basa en la recolección de datos de trabajos previos e integrada para los propósitos del presente estudio. De las fuentes previamente citadas se realizará una selección de la información aplicable para el presente caso.

### 2.5.1 Ajustes de Ecuación

El estudio parte, como se mencionó anteriormente, de la revisión de la ecuación (1) original del trabajo "Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo" Molina, N. Piza, C. y Wills, A. (2007):

$$V_{i+1} = V_i + P \frac{Ac_{i+1} + Ac_i}{2} + Esc \frac{Ad_{i+1} + Ad_i}{2} - \frac{Qc_{i+1} + Qc_i}{2} - (ETP_{esp} * A_{esp}) - ETP_{her} \frac{A_{her_{i+1}} + A_{her_i}}{2}$$

Dónde:

$V_{i+1}$  = almacenamiento en la ciénaga al final del período

$V_i$  = almacenamiento en la ciénaga al comienzo del período

$P$  = precipitación directa sobre la ciénaga

$A_c$  = área superficial de la ciénaga

$A_d$  = área de la cuenca drenante

$A_{esp}$  = área del espejo de agua

$A_{her}$  = área herbazal

$Esc$  = escorrentía total aportada por la cuenca drenante obtenida a partir del modelo de tanques.

$Q_c$  = caudal evacuado por el Caño Cachimbero

$ETP_{esp}$  y  $ETP_{herb}$  = evapotranspiración desde el espejo de agua y el herbazal, respectivamente.

Esta ecuación no considera el aporte de cuerpos de agua subterráneos, que en el caso de Limoncocha parecen tener una importancia relevante, por lo que una modificación a ese modelo tiene necesariamente que agregar esta variable, que incorpora en forma global a aportes que podrían darse tanto desde el noroccidente de la laguna como desde el río Napo.

Por consecuencia la mencionada ecuación ha sido modificada para el caso de la Laguna de Limoncocha introduciendo flujos subterráneos aportantes. Por la disponibilidad limitada de datos, se ha tomado cinco períodos de un mes (Enero-Febrero, Febrero-Marzo, Marzo-Abril, Abril- Mayo, Mayo -Junio) para ajustar el modelo, con las limitaciones que esto implica. La ecuación del trabajo realizado en Cachimbero no especifica en su ecuación un valor delta t ( $\Delta t$ ) para el periodo de tiempo, por lo que éste deberá ser considerado en la ecuación de balance hídrico de la laguna de Limoncocha de la siguiente manera:

$$V_{i+1} = V + P \frac{A_{i+1} + A_i}{2} + (\Sigma Q) \Delta t - (ETP_{esp} * A_{esp}) - ETP_{zi} \frac{A_{zi+1} + A_{zi}}{2} + V_{sub} \quad (2)$$

Este concepto implica que la variación que se produce en el volumen almacenado en la laguna en un periodo de tiempo, es función del valor de los aportes hacia la laguna en ese periodo. Ya que la ecuación está dada en volúmenes en el término de los caudales para poder transformarlo a volúmenes se optó por considerar un intervalo de tiempo. En base a este concepto, la ecuación modificada propuesta es la siguiente:

$$V_{i+1} = V_i + P \frac{A_{i+1} + A_i}{2} + \left( \text{Esc} - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2} \right) \Delta t - \left( \text{ETP}_{\text{esp}} * A_{\text{esp}} \right) - \text{ETP}_{\text{zi}} \frac{A_{\text{zi}_{i+1}} + A_{\text{zi}_i}}{2} + V_{\text{sub}} \quad (3)$$

Dónde:

$V_{i+1}$  = almacenamiento en la laguna al final del período

$V_i$  = almacenamiento en la laguna al comienzo del período

$P$  = precipitación directa sobre la laguna

$A_l$  = área superficial de la laguna

$A_d$  = área de la cuenca drenante

$A_{\text{esp}}$  = área del espejo de agua

$A_{\text{zi}}$  = área zona inundable

$\text{Esc}$  = escorrentía total aportada por la cuenca drenante obtenida a partir de la fórmula racional.

$Q_l$  = caudal evacuado por la Laguna de Limoncocha (Caño)

$\text{ETP}_{\text{esp}}$  y  $\text{ETP}_{\text{zi}}$  = evapotranspiración desde el espejo de agua y la zona inundable, respectivamente.

$V_{\text{sub}}$  = Volumen subterráneo aportado por el flujo subterráneo

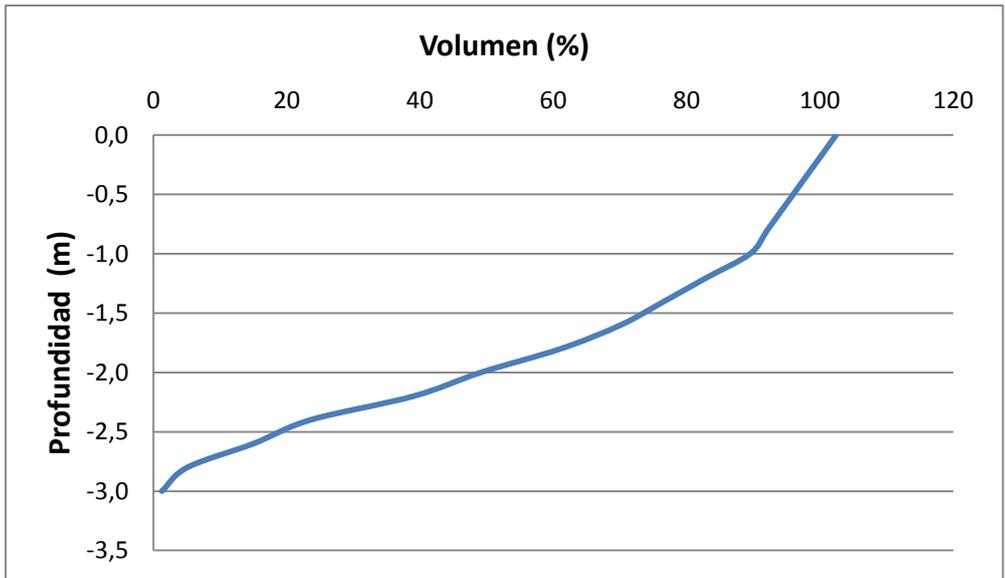
Nota: Profe creo que los subíndices solo aplicarían para  $i$  y  $i+1$  pues no sería factible doble subíndice

## 2.5. 2 Recolección de datos

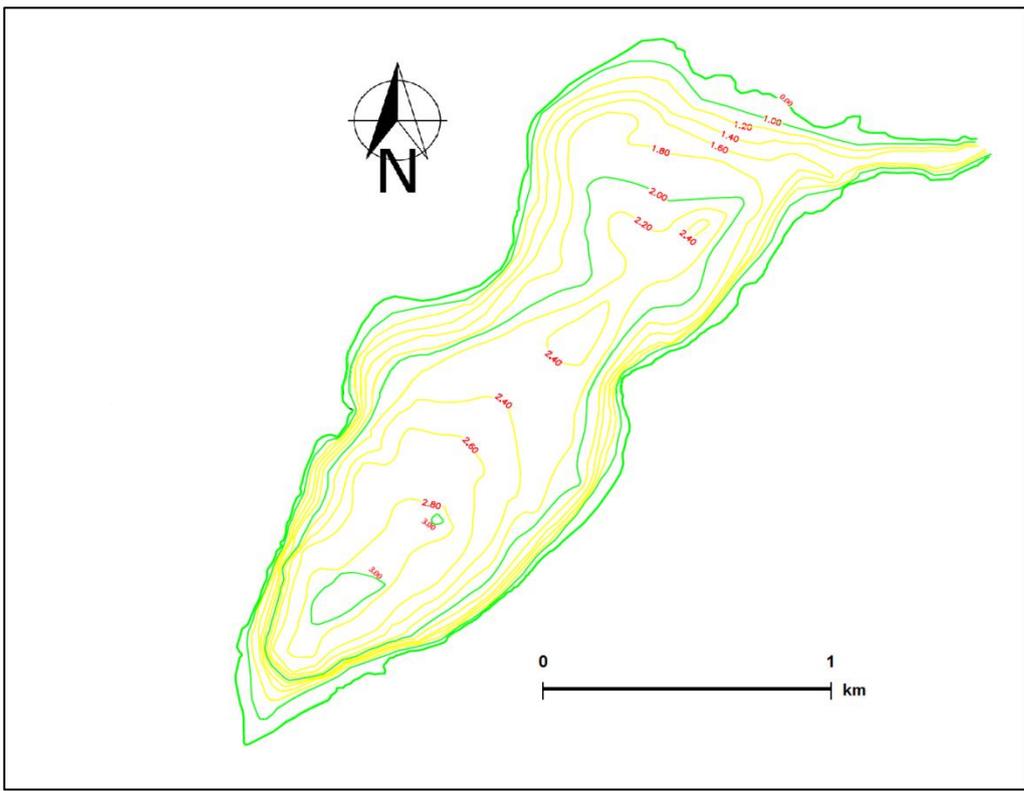
### Almacenamiento en la laguna al comienzo y final del período ( $V_i$ , $V_{i+1}$ )

Para el parámetro de almacenamiento en la laguna al comienzo y al final del período se utilizará la curva hipsográfica de profundidad – volumen obtenida a partir de los datos del levantamiento batimétrico (Figura 6.)

(Villalba & Revelo, en preparación).



**Figura 6:** Curva profundidad-Volumen Laguna de Limoncocha (Villalba & Revelo, en preparación).



**Figura 7:** Mapa Batimétrico (Villalba & Revelo, en preparación)

El volumen máximo de la laguna es 4350483 m<sup>3</sup> (Villalba & Revelo, en preparación) y se tomará como referencia este valor al comienzo del período y así se encontrará el valor al final del período y así sucesivamente en los demás

períodos. En el año 2012 Gabriel Revelo midió la variación del nivel de la laguna con respecto al muelle durante 6 meses obteniendo los siguientes datos:

**Tabla 1.** Variación del nivel de la laguna con respecto al muelle 2012.

Mes	Variación de nivel respecto a nivel de referencia (m)	Variación absoluta de nivel respecto al máximo nivel (m)
<b>Enero</b>	1,37	-0,27
<b>Febrero</b>	1,10	0,00
<b>Marzo</b>	1,23	-0,13
<b>Abril</b>	1,10	0,00
<b>Mayo</b>	1,25	-0,15
<b>Junio</b>	1,16	-0,06

(Revelo, 2012).

### **Precipitación directa sobre la laguna (P).**

Se recolectaron los datos de precipitación mensual del periodo Enero-Junio del 2012 (Mario Tobar INAMHI, comunicación personal) de las estaciones más cercanas a la RBL: estación El Coca Aeropuerto y estación Nuevo Rocafuerte respectivamente ya que no existe una estación en el área de estudio actualmente.

**Tabla 2:** Precipitación mensual del período Enero-Junio del 2012 (INAMHI).

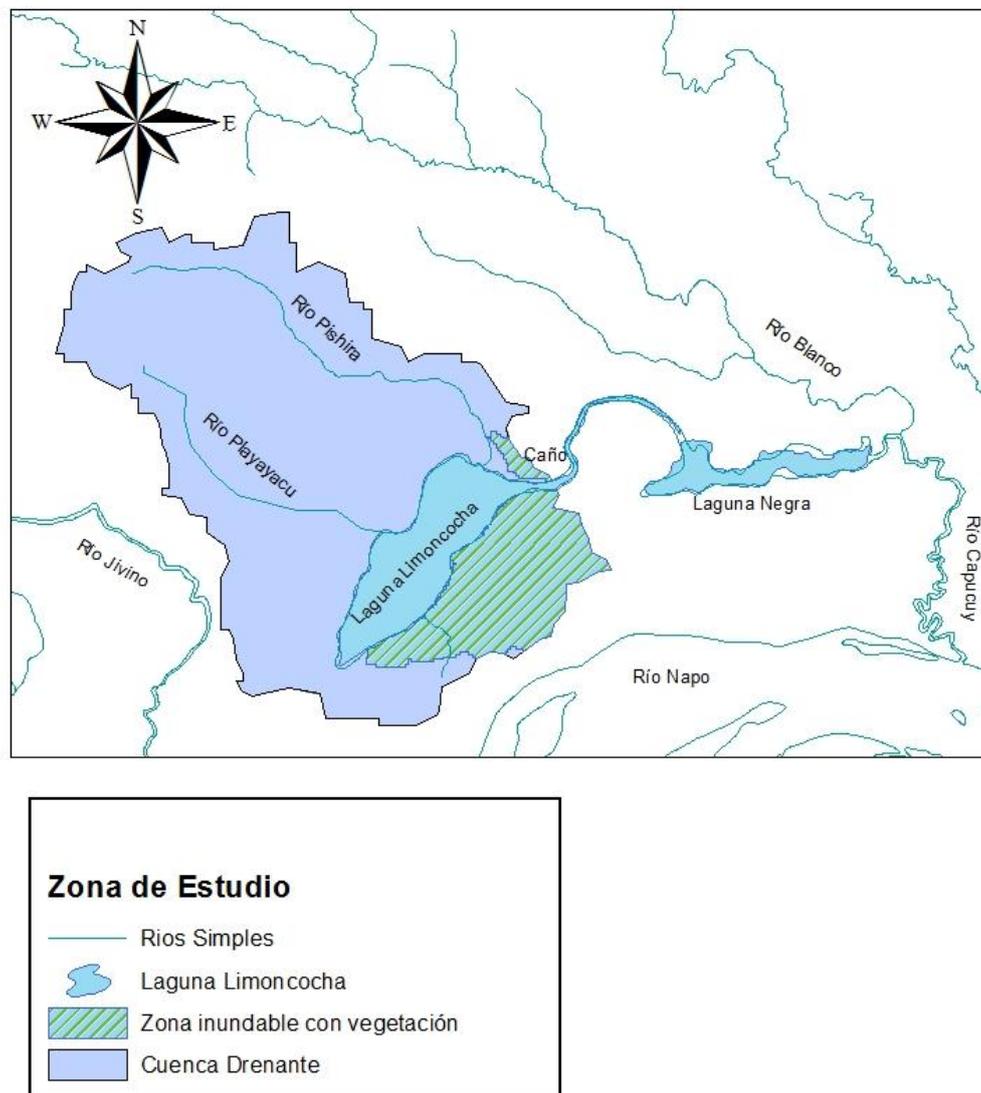
PRECIPITACION(mm) Año 2012 INAMHI	ESTACION	
	El Coca Aeropuerto	Nuevo Rocafuerte
<b>Enero</b>	289.2	76.3
<b>Febrero</b>	330.6	155.2
<b>Marzo</b>	453.6	497.4
<b>Abril</b>	279.0	219.5
<b>Mayo</b>	280.5	307.5
<b>Junio</b>	275.0	189.5

(Mosquera, 2014.)

Se realizará un promedio de los datos mensuales de precipitación de las dos estaciones de Enero a Junio y se obtendrá un valor final el cual será el dato de precipitación a utilizar en el modelo para cada intervalo de tiempo.

**Áreas: Superficial de la Laguna, cuenca drenante, espejo de agua y zona inundable. (Al, Ad, A<sub>esp</sub>, Azi).**

Mediante el programa ArcGis 10 se delimitó la cuenca drenante y la zona inundable de la zona de estudio, en la Figura 7 se aprecia la delimitación para el posterior cálculo de áreas de dichas zonas.



**Figura 8:** Zona de estudio para cálculo de áreas. (Anabell Mosquera, 2014.)

### **Escorrentía total aportada por la cuenca drenante (Esc).**

Para estimar la escorrentía se aplicará el método racional, por la razón que es un método muy apropiado cuando la información disponible de la zona de trabajo, de superficie no superior a 1.000 ha (10.000 km<sup>2</sup>), no es muy exhaustiva; su validez además depende de la fiabilidad de los valores del coeficiente de escorrentía (c) y del tiempo de concentración empleados en el cálculo (Sánchez, 2012).

Se escogió este método ya que la cuenca hidrográfica de la laguna de Limoncocha es pequeña, siendo su área 22,09 km<sup>2</sup>.

La expresión utilizada para el cálculo es:

$$Q = \frac{cIA}{3,6} \quad (4)$$

Dónde:

Q = caudal de escorrentía (m<sup>3</sup>/s)

c = coeficiente de escorrentía

I = intensidad de la precipitación (mm/h)

A = superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Para determinar el coeficiente de escorrentía (c) más acorde con las condiciones de relieve, vegetación, etc. de nuestra zona deberemos utilizar la siguiente tabla de acuerdo a las condiciones en el caso de Limoncocha:

**Tabla 3:** Coeficiente de Escorrentía.

Cobertura Vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta 50%-20%	Media 20%-8%	Suave 8%-1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos y vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierva y grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques y vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

(Ramírez, 2003)

Para determinar la intensidad de la precipitación se utilizará la precipitación máxima medida en un día (24 h) en el periodo de tiempo y se obtendrá un promedio de las dos estaciones respectivamente, se dividirá el resultado para 24 horas y así se obtendrá mm/h.

**Tabla 4:** Precipitación máxima en 24 horas (INAMHI, 2012).

PRECIPITACION MAXIMA en 24h (mm) Año 2012 INAMHI	ESTACION	
	El Coca Aeropuerto	Nuevo Rocafuerte
Enero	57,0	31,0
Febrero	44,8	34,0
Marzo	54,0	80,8
Abril	82,0	26,1
Mayo	29,5	71,8
Junio	89,8	32,8

(Mosquera, 2014.)

### Caudal evacuado por la laguna de Limoncocha (QI).

El caudal evacuado por el caño de la laguna de Limoncocha fue medido por Gabriel Revelo en los meses de Enero (comienzo del período) hasta Junio (final del período) del año 2012 y estos datos serán utilizados para el cálculo en la ecuación de balance hídrico de cada período.

## Evapotranspiración desde el espejo de agua y la zona inundable (ETP<sub>esp</sub>, ETP<sub>zi</sub>).

Numerosas fórmulas nos permiten evaluar la ETP con una aproximación suficiente para muchos estudios hidrológicos pero se ha decidido utilizar el método de Thornthwaite (1948). Los cálculos están basados en la determinación de la evaporación en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es ampliamente empleado en hidrología y en la estimación del balance hídrico para climatología e hidrología de cuencas.

Thornthwaite comprobó que la evapotranspiración era proporcional a la temperatura media afectada de un coeficiente exponencial a.

1. Se calcula un "índice de calor mensual" (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \quad (5)$$

2. Se calcula el "índice de calor anual" (I) sumando los 12 valores de i:

$$I = \sum i \quad (6)$$

3. Se calcula la ETP mensual "sin corregir" mediante la fórmula:

$$ETP_{\text{sin corr}} = 16 \left(\frac{10 * t}{I}\right)^a \quad (7)$$

Dónde:

ETP<sub>sin corr</sub> = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas)

t = temperatura media mensual, °C.

I = índice de calor anual, obtenido en el punto 2.

a =  $675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 0.49239$

4. Para el cálculo de la ETP de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar con la siguiente fórmula:

$$ETP = ETP_{\text{sin corr}} \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad (8)$$

Dónde:

ETP= Evapotranspiración potencial corregida

N= número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud. (Tabla 5).

d= número de días del mes

**Tabla 5:** Número Máximo de horas de sol.

Lat. Norte	En	Feb	Mar	Abr	May	Jn	Jul	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
Lat Sur	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
50	8,5	10,1	11,8	13,8	15,4	16,3	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1
48	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
46	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14,0	12,6	11,0	9,7	8,9
42	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,9	11,1	9,8	9,1
40	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3
35	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30	10,4	11,1	12,0	12,9	13,6	14,0	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3	13,7	13,5	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
20	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5	11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
0° Ecuador	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

(Doorenbos y Pruitt, 1977).

### Volumen aportado por flujo subterráneo (Vsub).

El flujo subterráneo se calculará por diferencia de volúmenes entre el volumen inicial y el volumen final de cada período. Así se justifica la importancia del flujo subterráneo en el caso de Limoncocha.

## 2.6 Validez y confiabilidad de los instrumentos

Los datos mencionados en el punto anterior serán revisados y evaluados a fin de utilizar aquellos que sean considerados enteramente válidos y confiables para el propósito del presente proyecto.

## 2.7 Procesamiento de datos

La información se procesará mediante hojas electrónicas Excel y también se utilizará el programa MatLab para optimizar el tiempo de cálculo.

Se utilizará ArcGis 10 para la obtención de los mapas que sean necesarios para la investigación, así también para la obtención de áreas.

### Almacenamiento en la laguna al comienzo y final del período ( $V_i$ , $V_{i+1}$ )

**Tabla 6:** Cálculo de volumen de almacenamiento al comienzo y final del período.

Mes	Variación de nivel respecto a nivel de referencia (m)	Variación absoluta de nivel respecto al máximo nivel (m)	Porcentaje según curva hipsométrica (Figura 5)	$V_i$ en $m^3$	$V_{i+1}$ en $m^3$
Enero	1,37	-0,27	97%	4219968,51	4350483
Febrero	1,1	0	100%	4350483	4293926,721
Marzo	1,23	-0,13	98,70%	4293926,721	4350483
Abril	1,1	0	100%	4350483	4306978,17
Mayo	1,25	-0,15	99%	4306978,17	4333081,068
Junio	1,16	-0,06	99,60%	4333081,068	4350483

(Mosquera, 2014)

## Precipitación directa sobre la laguna (P).

Se realizó un promedio entre las dos estaciones El Coca Aeropuerto y Nuevo Rocafuerte obteniendo:

Promedio Estaciones=  $\sum$  datos de las dos estaciones / 2.

**Tabla 7:** Cálculo de promedio de precipitación.

PRECIPITACION(mm) Año 2012 INAMHI	ESTACION		PROMEDIO ESTACIONES
	El Coca Aeropuerto	Nuevo Rocafuerte	
Enero	289,2	76,3	182,75
Febrero	330,6	155,2	242,9
Marzo	453,6	497,4	475,5
Abril	279,00	219,5	249,25
Mayo	280,50	307,5	294
Junio	275,00	189,5	232,25

(Mosquera, 2014)

Posteriormente, se realizó un promedio de precipitación por cada período mensual obteniendo:

**Tabla 8:** Cálculo de promedio de precipitación por período.

PERIODO	Datos a Calcular (mm)	PROMEDIO Precipitaciones (mm) [ $\sum/2$ ]	PROMEDIO Precipitaciones (m)
Enero-Febrero	182,75+242,9	212,83	0,21
Febrero-Marzo	242,9+475,5	359,20	0,36
Marzo-Abril	475,5+249,25	362,38	0,36
Abril-Mayo	249,25+294	271,63	0,27
Mayo-Junio	294+232,25	263,13	0,26

(Mosquera, 2014)

**Áreas: superficial de la laguna, cuenca drenante, espejo de agua y zona inundable. (Al, Ad, A<sub>esp</sub>, Azi).**

El área superficial de la laguna es de 2,28 km<sup>2</sup> igual que el área del espejo de agua (Villalba & Revelo, en preparación); expresada en metros cuadrados es 2280000 m<sup>2</sup>.

Por otro lado, las áreas de la cuenca drenante y de la zona inundable fueron calculadas mediante el programa Arc Gis 10 dando como resultado:

Área Cuenca drenante: 22,09 km<sup>2</sup>  
Área Zona Inundable: 3,16 km<sup>2</sup>

Datos a utilizar en metros cuadrados:

Área Cuenca drenante: 22090000 m<sup>2</sup>  
Área Zona Inundable: 3160000 m<sup>2</sup>

**Nota:** Las áreas al principio y al final de los períodos fueron consideradas con el mismo porcentaje según la curva hipsométrica.

**Escorrentía total aportada por la cuenca drenante (Esc).**

De acuerdo a la metodología planteada se utilizará la fórmula:

$$Q = \frac{cIA}{3,6} \quad (9)$$

El coeficiente de escorrentía ha sido tomado como 0,25 ya que para el caso de Limonocha se trata de una cobertura vegetal “bosques y vegetación densa”, tipo de suelo “semipermeable” y una pendiente de terreno “despreciable”; el dato fue tomado de la Tabla 3.

La intensidad se calculó de la siguiente manera:

**Tabla 9:** Cálculo de promedio de precipitación máxima.

PRECIPITACION MAXIMA 24h (mm) Año 2012 INAMHI	ESTACION		PROMEDIO ESTACIONES
	El Coca Aeropuerto	Nuevo Rocafuerte	
Enero	57,0	31,0	44,0
Febrero	44,8	34,0	39,4
Marzo	54,0	80,8	67,4
Abril	82,0	26,1	54,1
Mayo	29,5	71,8	50,7
Junio	89,8	32,8	61,3

(Mosquera, 2014)

Posteriormente se realizó un promedio de precipitación máxima (mm) y se dividió para 24 horas para obtener la intensidad en unidades mm/h

**Tabla 10:** Cálculo de intensidad de la precipitación.

PERIODO	Datos a Calcular	PROMEDIO Precipitación Máxima (mm/24h) [E/2]	INTENSIDAD DE LA PRECIPITACION (mm/h)
Enero-Febrero	44,0+39,4	41,70	1,74
Febrero-Marzo	39,4+67,4	53,40	2,23
Marzo-Abril	67,4+54,1	60,73	2,53
Abril-Mayo	54,1+50,7	52,35	2,18
Mayo-Junio	50,7+61,3	55,98	2,33

(Mosquera, 2014)

El área de la cuenca es igual a 22,09 km<sup>2</sup>.

Entonces;

Período Enero-Febrero

$$* Q = \frac{0,25 * 1,74 \frac{mm}{h} * 22,09 km^2}{3,6}$$

$$* Q = 2,67 m^3/s$$

\*Ejemplo de Cálculo

**Tabla 11:** Cálculo de escorrentía.

PERIODO	c (0,25)	A(22,09)	I	/3,6	Q (Escorrentía)
Enero-Febrero	0,25	22,09	1,74	3,6	2,67
Febrero-Marzo	0,25	22,09	2,23	3,6	3,41
Marzo-Abril	0,25	22,09	2,53	3,6	3,88
Abril-Mayo	0,25	22,09	2,18	3,6	3,35
Mayo-Junio	0,25	22,09	2,33	3,6	3,58

(Mosquera, 2014)

### Caudal evacuado por la laguna de Limoncocha (Ql).

Se utilizará los datos de caudal (m<sup>3</sup>/s) al inicio y al final de cada período de la siguiente Tabla 12:

**Tabla 12:** Caudal evacuado por el caño de la laguna de Limoncocha.

Caudal evacuado por la laguna de Limoncocha (Caño) 2012	
Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Enero	4,97
Febrero	13,68
Marzo	13,07
Abril	3,94
Mayo	14,57
Junio	12,24

(Revelo, 2012)

### Evapotranspiración desde el espejo de agua y la zona inundable (ETP<sub>esp</sub>, ETP<sub>zi</sub>).

En primer lugar se calculó el promedio de las dos estaciones y se obtuvo una temperatura para todos los meses del año 2012.

**Tabla 13:** Cálculo de promedios de temperatura.

TEMPERATURA (°C) Año 2012 INAMHI	ESTACION		PROMEDIO ESTACIONES
	El Coca Aeropuerto	Nuevo Rocafuerte	
Enero	26,7	27,0	26,9
Febrero	25,9	26,4	26,2
Marzo	26,2	26,0	26,1
Abril	26,4	26,5	26,5
Mayo	26,2	26,1	26,2
Junio	26,6	25,9	26,3
Julio	24,7	25,7	25,2
Agosto	26,3	26,2	26,3
Septiembre	27,0	26,3	26,7
Octubre	27,2	27,1	27,2
Noviembre	27,2	27,4	27,3
Diciembre	26,6	27,3	27,0

(Mosquera, 2014)

1. Se calculó un “índice de calor mensual” (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

**Tabla 14:** Cálculo de índice de calor mensual (i).

MES	T MEDIA MENSUAL	ECUACIÓN $i=(t/5)^{1,514}$
Enero	26,9	12,78
Febrero	26,2	12,28
Marzo	26,1	12,21
Abril	26,5	12,49
Mayo	26,2	12,28
Junio	26,3	12,35
Julio	25,2	11,57
Agosto	26,3	12,35
Septiembre	26,7	12,63
Octubre	27,2	12,99
Noviembre	27,3	13,07
Diciembre	27	12,85

(Mosquera, 2014)

2. Se calcula el “índice de calor anual” (I) sumando los 12 valores de i:

$$I = \sum i$$

$$I = 149,83$$

3. Se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la fórmula:

$$ETP_{\text{sin corr}} = 16 \left( \frac{10 * t}{I} \right)^a$$

**Tabla 15:** Cálculo de evapotranspiración potencial sin corregir.

MES	T MEDIA MENSUAL	I	a	ECUACIÓN ETPsin corr=16 ((10*t)/I)^a
Enero	26,9	149,83	3,71	140,29
Febrero	26,2	149,83	3,71	127,21
Marzo	26,1	149,83	3,71	125,42
Abril	26,5	149,83	3,71	132,70
Mayo	26,2	149,83	3,71	127,21
Junio	26,3	149,83	3,71	129,02

(Mosquera, 2014)

4. Para el cálculo de la ETP de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar con la siguiente fórmula:

$$ETP = ETP_{\text{sin corr}} \frac{N d}{12 30}$$

Entonces;

**Tabla 16:** Cálculo de evapotranspiración potencial corregida

MESES	FORMULA por PERIODOS ETPsin corr=16 $((10*t)/I)^a$	N/12 12.1/12	d/30	ETP Corregida mm/mes
Enero	140,29	1	1,03	144,97
Febrero	127,21	1	1	127,21
Marzo	125,42	1	1,03	129,60
Abril	132,7	1	1	132,70
Mayo	127,21	1	1,03	131,45
Junio	129,02	1	1	129,02

(Mosquera, 2014)

ETP para cada período:

**Tabla 17:** Cálculo de evapotranspiración potencial.

PERIODO	ETP CORREGIDA m
Enero-Febrero	0,136
Febrero-Marzo	0,128
Marzo-Abril	0,131
Abril-Mayo	0,132
Mayo-Junio	0,130

(Mosquera, 2014)

### Volumen aportado por flujo subterráneo ( $V_{sub}$ ).

Los resultados del volumen aportado por el flujo subterráneo se obtuvieron por diferencia de almacenamiento del período final e inicial.

**Tabla 18:** Cálculo de volumen aportado por flujo subterráneo.

<b>VOLUMEN DE FLUJO SUBTERRANEO POR DIFERENCIA DE ALMACENAMIENTOS</b>		
<b><math>V_{i+1}</math></b>	<b>Balance</b>	<b><math>V_{sub}</math></b>
4219968,51	4108884,23	111084,28
4350483	4598117,916	-247634,916
4293926,72	4651604,91	-357678,189
4350483	4300643,235	49839,765
4306978,17	4305514,358	1463,812

(Mosquera, 2014)

## CAPITULO III

### RESULTADOS

#### 3.1 Levantamiento de datos

Los datos fueron recopilados de varias fuentes bibliográficas así también de tesis con referencia al presente trabajo, según se indica en el texto.

#### 3.2 Presentación y análisis de resultados

Para aplicar los datos obtenidos previamente, se necesita que las unidades estén uniformes para proceder a analizarlos en la ecuación de balance hídrico.

Los datos se procesaron en una hoja de Excel donde fácilmente se apreció la importancia del volumen aportado por el flujo subterráneo.

En primera instancia se utilizó la ecuación excluyendo el volumen aportado por el flujo subterráneo utilizando la ecuación (3):

$$V_{i+1} = V_i + P \frac{A_{i+1} + A_i}{2} + (Esc - \frac{Q_{i+1} + Q_i}{2}) \Delta t - (ETP_{esp} * A_{esp}) - ETP_{zi} \frac{A_{zi+1} + A_{zi}}{2} + V_{sub}$$

**Tabla 19:** Resultados del balance hídrico de la laguna de Limoncocha desconociendo el volumen aportado por el flujo subterráneo.

PERIODO mes	$V_{i+1}$ $m^3$	$V_i$ $m^3$	P m	$A_{i+1}$ $m^2$	$A_i$ $m^2$	Esc $m^3/s$	$Q_{i+1}$ $m^3/s$	$Q_i$ $m^3/s$	$ETP_{esp}$ m	$A_{esp}$ $m^2$	$ETP_{zi}$ m	$A_{zi+1}$ $m^2$	$A_{zi}$ $m^2$	$V_{sub}$ $m^3$	BALANCE SIN $V_{sub}$ $m^3$
Enero- Febrero	4219968,5	4350483	0,21	2211600	2280000	2,67	13	13,68	0,136	2211600	0,136	3160000	3160000	DESCONOCIDO	4108884,23
Febrero- Marzo	4350483	4293926,7	0,36	2280000	2234400	3,41	13,68	13,07	0,128	2280000	0,128	3160000	3476000	DESCONOCIDO	4598117,92
Marzo-Abril	4293926,7	4350483	0,36	2234400	2280000	3,88	13,07	13	0,131	2234400	0,131	3160000	3160000	DESCONOCIDO	4651604,91
Abril-Mayo	4350483	4306978,2	0,27	2280000	2257200	3,35	13	14,57	0,132	2280000	0,132	3160000	3160000	DESCONOCIDO	4300643,24
Mayo-Junio	4306978,2	4333081,1	0,26	2257200	2270880	3,58	14,57	12,24	0,13	2257200	0,13	3160000	3160000	DESCONOCIDO	4305514,36

(Mosquera, 2014)

Como se puede apreciar en la Tabla 19 el flujo subterráneo parece aportar en el balance hídrico, por tal razón el flujo desconocido es la diferencia entre el almacenamiento al final del período y el resultado de balance hídrico por tal razón el resultado final se presenta a continuación:

**Tabla 20:** Tabla de resultados del balance hídrico de la laguna de Limoncocha.

PERIODO mes	$V_{i+1}$ $m^3$	$V_i$ $m^3$	P m	$Al_{i+1}$ $m^2$	$Al_i$ $m^2$	Esc $m^3/s$	$Q_{li+1}$ $m^3/s$	$Q_{li}$ $m^3/s$	$ETP_{esp}$ m	$A_{esp}$ $m^2$	$ETP_{zi}$ m	$A_{zi+1}$ $m^2$	$A_{zi}$ $m^2$	$V_{sub}$ $m^3$	BALANCE HIDRICO $m^3$
Enero- Febrero	4219968,5	4350483	0,21	2211600	2280000	2,67	13	13,68	0,136	2211600	0,136	3160000	3160000	111084,28	4219968,5
Febrero- Marzo	4350483	4293926,7	0,36	2280000	2234400	3,41	13,68	13,07	0,128	2280000	0,128	3160000	3476000	-247634,916	4350483
Marzo-Abril	4293926,7	4350483	0,36	2234400	2280000	3,88	13,07	13	0,131	2234400	0,131	3160000	3160000	-357678,189	4293926,7
Abril-Mayo	4350483	4306978,2	0,27	2280000	2257200	3,35	13	14,57	0,132	2280000	0,132	3160000	3160000	49839,765	4350483

Mayo-Junio	4306978,2	4333081,1	0,26	2257200	2270880	3,58	14,57	12,24	0,13	2257200	0,13	3160000	3160000	1463,812	4306978,2
------------	-----------	-----------	------	---------	---------	------	-------	-------	------	---------	------	---------	---------	----------	-----------

(Mosquera, 2014)

En la Tabla 20 se puede apreciar que el balance hídrico incluyendo los flujos subterráneos se equipara.

Los valores positivos para  $V_{sub}$  en la tabla, representarían los aportes de flujo subterráneo a la laguna Limoncocha

Se puede apreciar que en los periodos de Febrero- Marzo y Marzo- Abril se tienen flujos con valor negativo, esto se debe a que en estos períodos de tiempo es donde más precipitación existe y la zona inundable se incrementa notablemente; esto es compatible con la propuesta planteada en el Modelo Conceptual del Sistema Hídrico de la Reserva Biológica (Figura 1.) en donde se establece una alimentación de la laguna con agua procedente de las zonas inundadas, las cuales alimentarían también agua de forma directa al Caño. Los valores negativos, por tanto, indicarían una excedencia del volumen de almacenamiento de la laguna, alcanzando un nivel que comunica la laguna con las zonas inundadas aledañas.

Los datos isotópicos presentados en la figura 4, corroboran el papel de la zona inundada en la alimentación a la laguna, ya que el río Napo, la zona inundada y la laguna prácticamente configurarían un solo cuerpo de agua en la época de altas precipitaciones, lo que explica la similitud de la composición isotópica entre el río Napo y la laguna en ese periodo.

El modelo tal como está planteado proporciona una aproximación bastante coherente con el esquema conceptual propuesto. Es necesario aclarar también que la validación del modelo con los datos disponibles es muy preliminar, ya que hay que considerar que los datos disponibles fueron limitados y en algunos casos no necesariamente fueron verificados al momento de su registro.

La validación o modificación del modelo propuesto solamente será viable cuando se disponga a futuro de una base de datos sólida, resultante de un monitoreo de los parámetros de interés en la laguna y zonas aledañas, a lo largo de un intervalo de tiempo de varios años.

## CAPITULO IV

### DISCUSIÓN

#### 4.1 Aplicación práctica

El presente trabajo con los ajustes necesarios a futuro podría llegar a ser 100 % confiable, se deberá mantener monitoreos permanentes in situ de todos los parámetros anteriormente citados, así se podrá aplicar a no sólo la laguna de Limoncocha, sino también a otros cuerpos lénticos de la Amazonía Ecuatoriana.

#### 4.2 Conclusiones

- Las aproximaciones justificables que se realizaron en la investigación para la aplicación del modelo propuesto, arrojaron un resultado coherente, pero que debe ser verificado a futuro. El modelo, por tanto, si constituye una primera aproximación válida para el sistema hídrico de la RBL.
- A diferencia del caso colombiano, en el modelo de balance hídrico de la laguna de Limoncocha es necesario incluir el volumen aportado por las aguas subterráneas y posiblemente evaluar de manera más profunda el papel que juegan las zonas inundadas dentro del sistema hídrico de la RBL.
- Los limitados datos disponibles proporcionan una idea básica del comportamiento general del sistema, pero su verificación más detallada requerirá del monitoreo permanente y sistemático de los niveles de la laguna y del río Napo, de los caudales de entrada y salida a la laguna, de la variación de la superficie de las áreas inundadas, de una mejor delimitación de la extensión de la laguna, del registro de la precipitación local, de la evapotranspiración, entre otros parámetros necesarios.

- La estimación de valores de parámetros, aun cuando se realice en base a ecuaciones y procedimientos de uso común, sin duda introduce márgenes de error en el modelo, por lo que a futuro será deseable utilizar mejores herramientas para su determinación; tal sería el caso de modelos para esorrentía, pero que naturalmente requerirán de una más completa base de datos.

### **4.3 Recomendaciones**

- Se recomienda realizar monitoreos permanentes y sistemáticos de los parámetros de la laguna de Limoncocha mencionados en el punto anterior, para la posterior mejora del modelo.
- Utilizar mejores herramientas para determinación del modelo de balance hídrico para evitar márgenes de error elevados.

## REFERENCIAS:

- Ayala, H. (2003). *Caracterización limnológica de la laguna de Limoncocha e identificación de las características hidrológicas*. Tesis de Grado. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Bello, M.; Pino, M. (2000). *Medición de presión y caudal*. Chile: Centro regional de investigación Kampenaike Ministerio de Agricultura.
- Bravo, J.B y N. J. Windevoxhel, 1997, *Manual para la identificación y clasificación de humedales en Costa Rica*, UICN/HORMA: MINAE: Embajada Real de los Países Bajos.
- Caro, E. 2011. *Evapotranspiración*. URL: <http://es.scribd.com/doc/56277109/Publicacion-Evapotranspiracion-Eduardo-Caro#download> Recuperado en 18 de Abril del 2014.
- Cole, G. 1988. *Manual de Limnología*. Buenos Aires - Argentina: Editorial Hemisferio Sur.
- Cowardin, L. et al., 1979, *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*. U.S. Fish and Wildlife Service, Department of the interior, 131 p.
- Doreenbos, J. y W.O. Pruitt. 1977. *Las necesidades de agua de los cultivos. Riego y Drenaje*. 24 FAO. 195 pp.
- Duque-Escobar, G. 2003. *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. (Rev. 2013).
- ECOLAP y MAE. 2007. *Guía del Patrimonio de Áreas Naturales Protegidas del Ecuador*. ECOFUND, FAN, DarwinNet, IGM. Quito, Ecuador.

- Giraldo, N. Piza, C. Wills, Á. 2007. *Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo*. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental — GAIA—. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Hawk, L. A. P. Lipstein, H.T. Solanki. *Wetland Hydroperiod Analysis*. Proc. 6th Biennial Stormwater Research & Watershed Management Conference. Tampa, Florida, South West Florida Water Management District. September 14-17, 1999. pp. 216-225 URL: <http://www.stormwaterresources.com/Library/107WWetlandHydroperiod.pdf>. Recuperado en 26 de Noviembre de 2013.
- Hiscock, K., Bense, V. (2014). *Hydrogeology principles and practice*. Second edition. Wiley Blackwell.
- Ledesma Manuel, 2011, *Principios de meteorología y climatología*. Ediciones Paraninfo, SA 1ª Edición, España.
- Ordoñez, C. 2013. *Caracterización geoquímica de sedimentos de la Laguna Limoncocha*. Tesis de Post Grado. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Ramírez, Maritza. 2003. *Hidrología Aplicada*. Universidad de Los Andes.
- Rengifo, Y, S. 2008. *Modelamiento matemático aplicado al modelamiento espacial*. Bogotá, Colombia.
- Revelo, G. 2012. *Muestreo y determinación de variaciones físicas en la Laguna de Limoncocha*, Tesis de Grado. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Roldán, G. y Ramírez, J. 2008. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. (2da. Ed.). Colombia: Universidad de Antioquia de Medellín.
- Rodríguez, L. 2012. *Caracterización Físicoquímica y microbiológica de muestras de agua del sistema hídrico de la Reserva Biológica de Limoncocha*. Tesis de Grado. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.

- Sánchez, J. (2012). *Métodos para Cálculo de Escorrentía*. San Román-Dpto. Geología-Universidad de Salamanca, España.
- Thornthwaite. C. W. 1948. *An approach towards a rational classification of climate*. Rev. 38: 55-89.
- UNESCO-WHO, 1998. *International Glossary of Hydrology* .Geneva n°. 12:343 pp.
- UNOPS-PNUMA, 2013. *Estudio de balance hídrico de la cuenca alta del río Apurímac "EBHICA"*.URL: <http://balancehidrico.org/balance-hidrico/90-en-que-consiste-el-balance-hidrico.html>. Recuperado en 10 de Diciembre de 2013.
- Villalba, F. y Revelo G. En preparación. *Morfología e hidrología de la laguna de Limoncocha*. Quito, Ecuador.
- WALSH. (2003). Línea base para la actualización del Plan de Manejo de la Reserva Biológica Limoncocha. Quito: WALSH ENVIRONMENTAL SCIENTISTS AND ENGINEERS, INC.