



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Programa de Doctorado en Ingeniería Agrícola

**Síntesis del sistema hidrológico del río Chagres,  
República de Panamá**



HAYDEE ISABEL OSORIO UGARTE  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2014

Profesor Guía: José Luis Arumí Ribera  
Decano, Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Profesor Guía: Diego Rivera Salazar  
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Agrícola  
Universidad de Concepción

Síntesis del sistema hidrológico del río Chagres, República de Panamá.

APROBADA POR

José Luis Arumí Ribera  
Ing. Civil, PhD.

---

Profesor Guía

Diego Rivera Salazar  
Ing. Civil, Doctor.

---

Profesor Guía

Enrique Muñoz  
Ing. Civil, Doctor.

---

Evaluador Externo

Mario Lillo Saavedra  
Ing. Civil Eléctrico, Doctor

---

Director del Programa



## Índice

## Contents

1. Resumen.....	13
2. Introducción .....	14
3. Estado del Arte.....	20
Conceptos de Hidrología .....	20
3.1 El Ciclo Hidrológico .....	20
3.2 Balance Hídrico o Régimen Hídrico .....	20
3.1.3 Ecuación fundamental del balance hídrico.....	21
3.1.4 Ciclo hidrológico de una cuenca drenada.....	21
3.2 Principios fundamentales de la modelación de cuencas .....	23
3.2.1 Conceptualización de escalas .....	24
3.3 Arquitectura de los modelos precipitación escorrentía .....	25
3.4 Estimación de la señal de respuesta (caudal modelado) .....	28
3.4.1 Almacenaje lineal y No lineal .....	28
4. Hipótesis y Objetivo.....	30
Hipótesis.....	30
Objetivos.....	30
4.1 Objetivo general.....	30
4.2 Objetivos específicos (ver figura 4.1).....	30
5. Materiales.....	32
5.1 Área de estudio.....	32
5.1.1 Cuenca del río Chagres.....	32
5.1.2 Geología y Geomorfología .....	34
5.1.3 Climatología.....	39
5.1.4 El Niño Oscilación del Sur.....	39
5.1.5 Vegetación y Uso de Suelo.....	41
5.2 Datos.....	46
Hidrología y meteorología.....	46
Vegetación, uso suelo y geología .....	48
Modelo de elevación digital .....	48
6. Metodología .....	50
6.1 Estimación del balance hídrico (OE1).....	50
A. Estimación de la precipitación de forma geodistribuida.....	51
A.1 Variantes del Kriging .....	51

A.2 Kriging con External Drift.....	52
6.1.1 Estimación de la evapotranspiración.....	52
6.1.2 Downward or Top-down approach para la construcción de modelos (aproximación de interpolación).....	55
6.1.3 Análisis de la curva de recesión.....	56
6.2 Desarrollar un modelo conceptual basado en la geomorfología y litología que represente el movimiento o cambios en los volúmenes de almacenamiento disponible entre estaciones en la subcuenca de El Río Chagres (OE2).....	56
6.3 Mejorar el modelo Brown y Ferrer (1973), modificado por Muñoz (2010), para identificar variables dominantes en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Chagres y agregar su parametrización en el modelo hidrológico. (OE 3).....	57
6.3.1 Aplicación del Modelo Brown, Ayala y Ferrer, adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz 2010 .....	58
6.3.1.1 Optimización de los parámetros del modelo .....	63
6.3.2 Identificación de variables dominantes e inclusión de su parametrización en arquitectura del modelo cuenca del río Chagres. ....	63
6.3.2.1 Arquitecturas propuestas como modificación conceptual al modelo Brown, Ayala y Ferrer (1973).....	64
a. Cambio en la contabilización de la humedad del suelo no lineal. ....	64
b. Aumento de particiones del caudal antes de llegar al cauce del río.....	68
c. Subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) y de la percolación, debido el aumento de niveles de humedad en el suelo.....	69
6.3.2.2 Optimización de los parámetros del modelo modificado.....	70
6.4 Proponer variables a monitorear en la subcuenca del Río Chagres que coadyuven a la gestión hídrica de la cuenca del canal (OE4).....	71
7. Resultados y Discusiones .....	73
8. Conclusiones .....	89
9. Bibliografía.....	91

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Aproximaciones de Downward (interpolación) y Upscaling (extrapolación) a la teoría de desarrollo de hidrología de cuencas (catchment hydrology). Intercambio de conocimiento y entendimiento en múltiples escalas.....15

Figura 2.2. Respuesta de, la cuenca o cuenca drenada, en su señal final de caudal.....16

Figura 3.1. Ciclo hidrológico de una cuenca drenada. Adaptado de McDonnell (2013). 4th Aberdeen Catchment Science Summer School. A brief introduction to catchment science.....22

Figura 3.2. Relaciones esquemáticas entre los procesos de escala espacial y temporal. Los rectángulos indican el espacio mínimo y la extensión máxima de la precipitación y de la escorrentía, ambos en escala de tiempo y espacio. ....26

Figura 3.3. Análisis de las relaciones extrapoladas (uploading) de resultados. Iniciando de pequeñas escalas (sencillo) a mayores escalas (complejo), o viceversa. ....27

Figura 3.4. Fase inicial de la modelación hidrológica precipitación escorrentía. ....28

Figura 3.5. Fase de procesamiento de los procesos hidrológicos precipitación escorrentía.....29

Figura 4.1. Conexiones entre los objetivos específicos de la tesis doctoral. ....31

Figura 5.1. Ubicación de la República de Panamá.....32

Figura 5.2. Elevaciones del relieve en la cuenca del canal de Panamá.....33

Figura 5.3. Ubicación y extensión del canal de Panamá. ....33

Figura 5.4. Cuenca Alta del Canal, República de Panamá. Arriba: Fallas importantes de la geología.....	35
Figura 5.5. Cuenca Alta del Canal, República de Panamá.....	36
Figura 5.6. Imagen de la formación Ocú (K-CHao) en el Río Boquerón.....	37
Figura 5.7. Alineamientos hacia el noreste de los bloques levantados y hundidos a manera de gradas, que sugieren movimientos verticales por fallas.....	37
Figura 5.8. Cambios en la corriente aguas arriba del Río Chagres.....	38
Figura 5.9. Ejemplos de litologías típicas observadas a lo largo del Río Chagres y sus tributarios.....	38
Figura 5.10. Ubicación de las regiones El Niño.....	40
Figura 5.11. Comportamiento del ENSO sobre el NIÑO3.4.....	41
Figura 5. 12. Flujos preferenciales originados por las raíces de los árboles en el río Chagres, cabecera.....	46
Figura 5. 13. Red de estaciones meteorológicas en la cuenca del canal de Panamá.....	47
Figura 5.14. Cobertura vegetal cuenca alta canal de Panamá. ACP 2008.....	49
Figura 6.1. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET. FAO 56.....	53
Figura 6.2. Modelo Conceptual definido por Modelo Brown, Ayala y Ferrer, adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz 2010.....	58
Figura 6.3 Componentes del ciclo hidrológico de una cuenca drenada. Elaboración basada en los procesos a representar para la cuenca del Río Chagres, República de Panamá.....	66

Figura 6.4 Relación entre la humedad del suelo, capacidad del campo, coeficiente de escorrentía y valor del exponente de la ecuación no lineal (HOU).....	67
Figura 6.5. Esquema conceptual de los procesos de la cuenca del Río Chagres.....	68
Figura 6.6. Subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) y de la percolación. ....	69
Figura 7.1. Lluvia geodistribuida sobre la cuenca del canal de Panamá. Año 1965 a 1997.....	73
Figura 7.2. Comparación de anomalías cálidas y frías sobre la cuenca del canal de Panamá.....	74
Figura 7.3. Valores diarios de evapotranspiración de la cuenca alta del canal de Panamá.....	75
Figura 7.4. Balance Hídrico anual cuenca alta canal de Panamá.....	77
Figura 7.4a. Conexión del Umbral entre las cuencas Río Boquerón, Pequení y Chagres.....	78
Figura 7.5. Patrones de la señal del cambio mensual en la cuenca alta del canal de Panamá.....	79
Figura 7.6. Curvas de recesión de la cuenca alta del canal de Panamá.....	80
Figura 7.7. Distribución de probabilidad de Weibull.....	81
Figura 7.8. Relación escorrentía/precipitación de la cuenca alta del canal.....	82
Figura 7.9. Modelo conceptual de la cuenca del río Chagres aplicable a la cuenca alta del canal de Panamá.....	83

Figura 7.10. Modelo perceptual de la cuenca del río Chagres aplicable a la cuenca alta del canal de Panamá.....84

Figura 7.11. Simulación de los datos observados con el modelo Brown, Ayala y Ferrer (BAF),.....86

Figura 7.12. Simulación con la modificación al modelo BAF.....87





INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Chagres. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).....43

Tabla 5.2. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Pequení. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).....44

Tabla 5.3. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Boquerón. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).....45

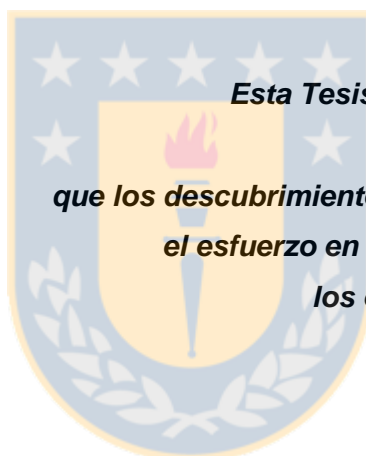
Tabla 7.1 Variación de evapotranspiración en milímetros por mes. Cuenca alta del canal. Konstantine P. Georgakakos (2007).....75



*En el Principio las cuencas se formaron...*



[6].Dijo Dios: \*Haya una bóveda en medio de las aguas, para que separe unas aguas de las otras.+ [7].Hizo Dios entonces como una bóveda y separó unas aguas de las otras: las que estaban por encima del firmamento, de las que estaban por debajo de él. Y así sucedió. [8].Dios llamó a esta bóveda "Cielo". Y atardeció y amaneció: fue el día Segundo. [9].Dijo Dios: \*Júntense las aguas de debajo de los cielos en un solo depósito, y aparezca el suelo seco.+ Y así fue. [10].Dios llamó al suelo seco "Tierra" y al depósito de las aguas "Mares". Y vio Dios que esto era bueno.(Génesis 1:6-10)



***Esta Tesis está muy especialmente dedicada  
a mis Alumnos,  
que los descubrimientos que El Señor otorgó a mi mente,  
el esfuerzo en entenderlos y plasmarlos en papel,  
los enriquezcan para ser profesionales  
conservando su ética,  
moral, valores y  
dedicación.***

**Agradecimiento:**

A los profesores guías, José Luis Arumí, Diego Rivera Salazar.

**Agradecimiento por el soporte económico a:**

***Fondos para la realización de la Estudio Doctorado y Tesis Doctoral***

*Programa de Becas Doctorales y Posdoctorales 2005-2010 SENACYT – IFARHU*

***Terminación de Tesis***

*Proyecto 60120.939.33 FONDAP-CRHIAM/Prof. Fernando Concha*



## 1. Resumen

El río Chagres, ubicado en el canal de Panamá, República de Panamá, es la fuente más importante de abastecimiento de agua para el funcionamiento del canal. Entender la relación precipitación escorrentía en esta cuenca, así como las conexiones de sus flujos subsuperficiales es vital para el manejo del canal.

En la presente tesis doctoral se ha apoyado en el entendimiento de los procesos hidrológicos de la relación precipitación escorrentía. Se mejoró un modelo hidrológico que permitió identificar variables dominantes dentro de la dinámica del agua. Se realizaron modificaciones, primeramente basadas en un modelo perceptual y posteriormente un modelo conceptual en la cuenca del río Chagres.

La modificación en la fase perceptual de la cuenca se hizo a través de imágenes fotográficas e información meteorológica y característica físicas de la cuenca del río Chagres, así como de sus cuencas aledañas. La modificación al modelo conceptual se basó el modelo Hidrológico Chileno, Brown Ayala y Ferrer (1973), codificado de lenguaje de programación FORTRAN® A MATLAB® por Rivano, con adaptaciones de Correa y Rivera (2006), adaptado con la herramienta mcat de Matlab® por Vega (2009), y modificado por Muñoz (2010) quien agregó un módulo nival. La modificación en esta Tesis Doctoral incluyó adicionalmente el cambio del paso de datos mensuales a paso diario.

Las modificaciones en el modelo dieron como resultado la identificación de la percolación y la infiltración como variables importantes en obtener una mejor aproximación en la curva de recesión del río Chagres. Coadyuvando con este resultado, un mejor entendimiento en los procesos hidrológicos de la cuenca del río Chagres.

Finalmente, las modificaciones probaron la importancia de adaptar el modelo hidrológico de precipitación escorrentía a la cuenca bajo estudio, antes de utilizarlo como una herramienta replicable a cualquier realidad mundial.

**Palabras clave: hidrología, modelos hidrológicos, procesos hidrológicos.**

## 2. Introducción

La hidrología es definida como la ciencia que estudia el agua del Planeta Tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos (Maidment, 1992).

La hidrología está estrechamente relacionada con otras ciencias naturales y está interrelacionada con ellas a través del Ciclo Hidrológico (Figura 2.1), el cual es su principio fundamental. La cuantificación del agua dentro del ciclo hidrológico, permite entender los procesos que lo generan y que están conectados entre ellos, satisfaciendo con esto un doble objetivo : 1) cubrir las necesidades medioambientales y humanas, al saber dónde están las zonas húmedas y de sequía, y 2) aplicar eficientemente una gestión integrada (UNESCO, 2006)<sup>1</sup> que permita mejorar la planificación y manejo del recurso hídrico.

Conceptualizar la dinámica del agua en la cuenca requiere expresar el entendimiento del sistema basado en su observación previa. Esto es fundamental para crear una estructura conceptual que exprese hacia dónde, cómo y a través de qué se mueve el agua dentro de la cuenca hidrológica (McDonnell 2005, Hrachowitz 2009, Tetzlaff 2009), lo que luego es traducido en un modelo hidrológico que expresa la respuesta de la cuenca en una señal final de caudal (Figura 2.2) (Ferrer et al. 1973, Bergström 1976, Burnash 1995, Muñoz 2010). Generalmente, estos procesos se representan en expresiones matemáticas que cuantifican la partición de la precipitación en evapotranspiración, percolación, percolación en la zona profunda que genera la recarga del agua subterránea y la partición de la precipitación como escorrentía superficial (Hewlett y Hibbert 1967).

---

<sup>1</sup> Se entiende por gestión integrada la administración del recurso agua, tanto en forma cuantitativa, como en forma cualitativa. La misma se realiza en la cuenca o unidad básica de administración del recurso hídrico.

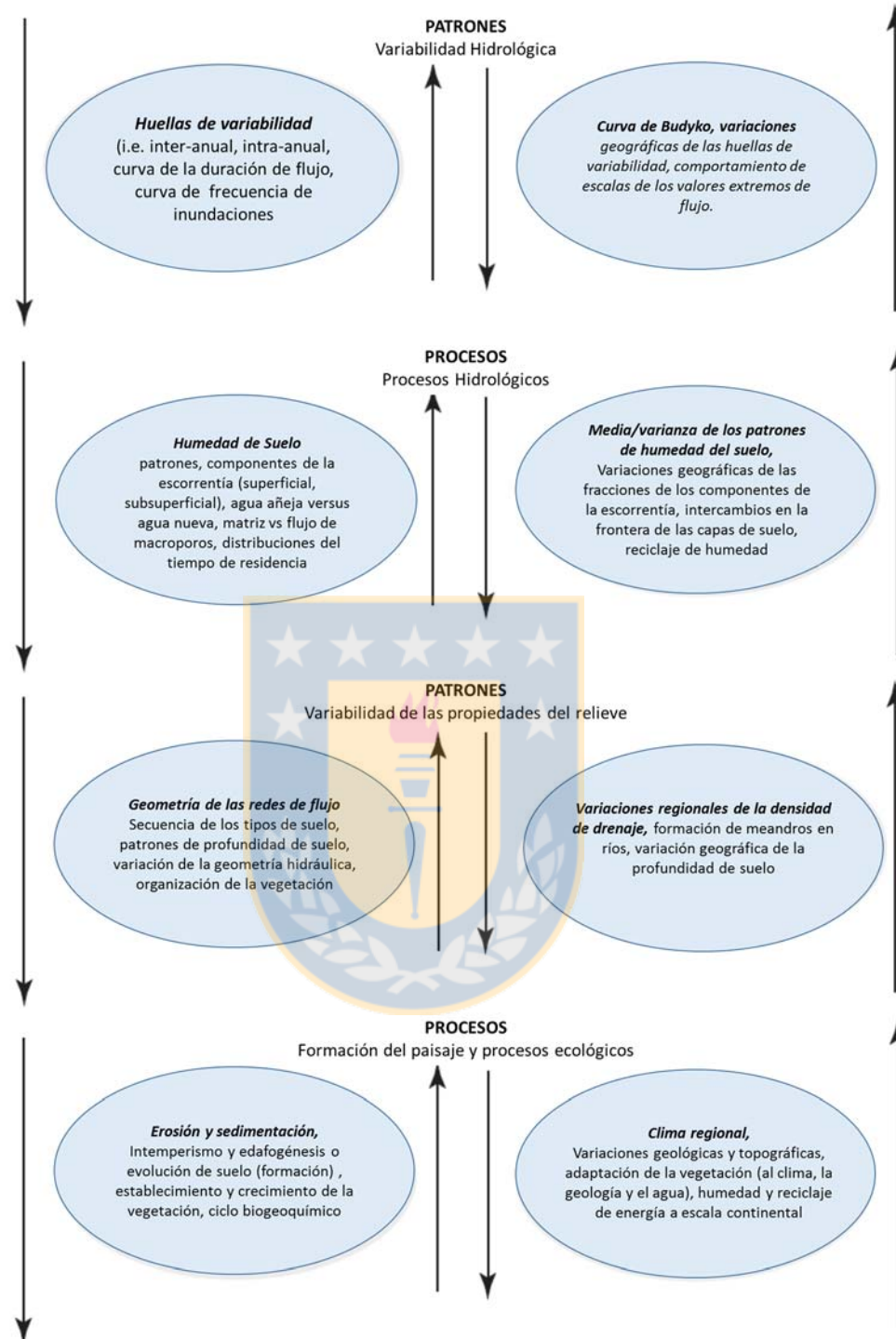


Figura 2.1. Aproximaciones de *Downward* (interpolación) y *Upscaling* (extrapolación) a la teoría de desarrollo de hidrología de cuencas (*catchment hydrology*). Intercambio de conocimiento y entendimiento en múltiples escalas. Traducido de *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Edited by M G Anderson. Chapter 13: Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale. MURUGESU SIVAPALAN. 2005 John Wiley & Sons, Ltd.

Durante décadas, la herramienta por excelencia para cuantificar los volúmenes y describir los procesos de la dinámica del agua en la cuenca, ha sido la modelación hidrológica, la cual a través del sistema hidrológico, procesa y describe la regulación de las entradas y salidas del agua dentro de la cuenca o sistema definido. La regulación varía dependiendo de los requerimientos de equilibrio en el sistema, es decir dependiendo de la cantidad de agua durante los años normales, lluviosos o de escasez.

Debido a la complejidad del ciclo hidrológico, diferentes formas perceptuales han originado modelos conceptuales de precipitación escurrentía (Beven y Kirby, 1979). Sin embargo, las características físicas, químicas y biológicas que se representan por la estructura de un modelo hidrológico, en ocasiones, son incapaces de representar con la misma confiabilidad la respuesta de otra cuenca hidrológica, debido a que las características de las cuencas son similares, más no iguales. Más aún, la dinámica de la cuenca puede estar conectada de diversas maneras como se observa en la Figura 2.2. De allí la importancia de los flujos subsuperficiales que determinan la dirección del movimiento del agua bajo el suelo.

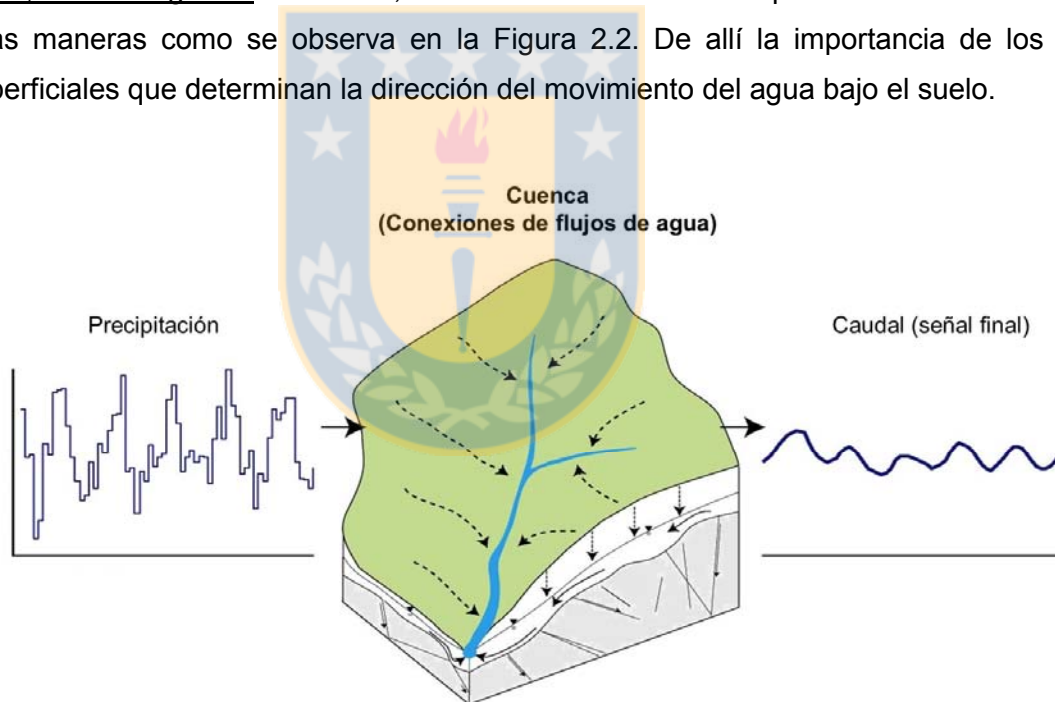


Figura 2.2. Respuesta de, la cuenca o cuenca drenada, en su señal final de caudal. McDonnell (2013). 4th Aberdeen Catchment Science Summer School.



## Actualidad del tema

Un reciente debate realizado por la revista científica, *Water Resources Research* (WWR), pone en la palestra del cuestionamiento a los modelos hidrológicos como herramienta para el aprendizaje de los recursos hídricos (Montanari, 2014).

La esencia del debate es enfatizar la necesidad de realizar un cambio de paradigma que permita contestar la pregunta sobre ¿cuál es el futuro de las ciencias hidrológicas? (Montanari, 2014), tomando en consideración que, a lo largo de décadas, el avance de las mismas ha sido un continuo ir y venir sobre las líneas de investigación planteadas (Hewlett y Hibbert, 1967) y sus hallazgos (Mosley, 1979). Es decir resultados que apoyan o no las hipótesis planteadas por corrientes de investigación. En el caso de Horton (1932) y su laboratorio hidrológico muchas hipótesis fueron probadas y otras no. Los hallazgos de las hipótesis probadas en cuanto a la infiltración permitieron construir nuevo conocimiento. Sin embargo, Horton no logró esclarecer de dónde venía (nivel de escala) o cómo se generaban los incrementos de escorrentía causados por lo que el intuía podrían ser flujos preferenciales.<sup>2</sup>

Gupta y Nearing (2014), consideran que la ventaja de realizar un cambio de paradigma frente al futuro de las ciencias hidrológicas, es la creación de un nuevo marco conceptual de la hidrología que permita mejorar la habilidad del proceso de aprendizaje, basando el mismo en una nueva perspectiva de Teoría de la Información, más que continuar enfocando el aprendizaje del sistema hidrológico en la parametrización generada por la arquitectura de un modelo hidrológico.

---

<sup>2</sup> Flujos preferenciales se refiere a las preferencias de camino que ocupa el flujo o corriente del agua para llegar de un lugar a otro. Se le conocen como preferenciales, porque las prefiere el agua. A veces son imperceptibles al ojo humano. En ocasiones definen las conexiones entre la presencia de agua sobre la superficie terrestre y bajo la superficie terrestre. Suelen estar definidos por la geología del lugar, por su geomorfología e incluso por el tipo de vegetación nativa o no del lugar.

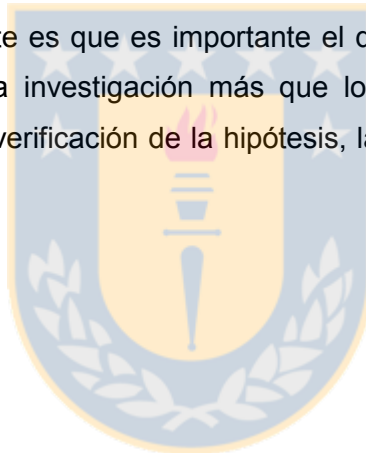
Para Horton, los flujos preferenciales fueron una incógnita presente en el sistema hidrológicos de su cuenca de laboratorio. Él hizo muchas mediciones en campo que reflejaban el hidrograma de crecida de su cuenca de estudio, en donde aparecían ciertos incrementos que aunque el intuía que se generaban por los flujos preferenciales del agua, no logró medirlos, porque se aparentemente tenían conexiones subsupericales que el no logró establecer, entender y medir.

### **Novedad del tema**

El aporte científico que conlleva la intención del desarrollo de esta tesis doctoral está dividido en dos:

Lo primero, es entender los procesos hidrológicos de la cuenca del río Chagres, a través de la dinámica de aprendizaje generada por medio de la información teórica previa y de la conceptualización perceptual de la misma, de forma, que sea descrita la cuenca en cuestión a través de la arquitectura del modelo hidrológico conceptual - perceptual<sup>3</sup>. Igual énfasis tiene el estudio de las relaciones generadas por los flujos subsuperficiales en la cuenca, en el balance interanual de la cuenca.

Lo segundo y más relevante es que es importante el desarrollo de las ideas y aplicaciones realizadas a lo largo de la investigación más que los resultados obtenidos. Si bien, los resultados son parte de la verificación de la hipótesis, la metodología es más relevante para llegar a ellos.



---

<sup>3</sup> Para crear un modelo hidrológico se requiere la visualización de la cuenca a estudiar de forma perceptual por parte del diseñador. La percepción del diseñador involucra cómo él vislumbra las conexiones geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, por mencionar algunas, de la cuenca. Es decir, cómo el diseñador percibe bajo su propio entendimiento la estructura natural de la cuenca.

Generar ideas perceptuales es una habilidad inherente a una persona. Ya que su percepción sobre la realidad, no depende de otros, sino de sus propias habilidades y talentos intelectuales, con los que ha nacido y/o que ha adquirido y desarrollado a través de los años. Esta tarea de percibir las conexiones hidrológicas en una cuenca dada, aunque parezca fácil, no lo es, puesto que la mente de cada individuo además de tener el talento, debe estar entrenada y el entrenamiento tiene como requisito que sea estar entrenada en este tema específico.

Una vez alcanzada la percepción del diseñador, se para a conceptualizar la percepción. Las percepciones del diseñador son plasmadas a través de conceptos, ya sean teóricos o matemáticos. De aquí la importancia de contar con profesionales capaces de cambiar una idea brillante a una expresión matemática que conglomerada y consolida la idea en algo utilizable de forma científica.

A nivel científico, existen muchas aplicaciones de un modelo hidrológico, mas muy pocas de modificaciones a un modelo existente.

## **Contexto histórico del área de estudio**

La República de Panamá, está ubicada entre América del Norte y América del Sur. Al norte colinda con el Mar Caribe y al Sur con el Océano Pacífico. En la parte más estrecha de Panamá, fue construido el Canal de Panamá, el cual inicio operaciones en el año 1914 y representa solamente el cuatro por ciento del territorio nacional de Panamá. El río que aporta la mayor cantidad de agua para el abastecimiento del canal es el río Chagres.

El río Chagres fue escogido como afluente principal para el canal debido a sus crecidas históricas, las cuales han sido registradas aproximadamente desde el año 1870. Un ejemplo es la crecida en Noviembre de 1880, donde el río alcanzó un caudal de 2266 m<sup>3</sup>/seg, logrando con ello incrementar su caudal promedio en estación lluviosa ocho veces (McCullough, 1977). Previa a la construcción del canal, el río Chagres drenaba hacia el Atlántico bordeando la cordillera (Figura 5.2). La construcción de canal implicó dinamitar la cordillera para crear el acceso Atlántico Pacífico y viceversa de las naves o barcos que utilizan la ruta interoceánica. Esto indica la importancia de la geología del área del canal en cualquier estudio hidrológico. Este corte geológico, acortó la planicie de inundación de las crecidas del río Chagres, tanto en distancia como en profundidad, circunscribiéndolas al área del Lago Alhajuela. Alhajuela es un lago artificial que retiene el caudal del río Chagres para su regulación y posterior uso, como fuente de agua para transportar barcos atlántico - pacífico y; como fuente de abastecimiento de agua potable de al menos, dos millones de habitantes, lo que equivale a la mitad de la población de la República de Panamá.

### 3. Estado del Arte

La hidrología es la ciencia que expresa la dinámica del agua, tanto bajo y sobre la superficie de la Tierra, así como las relaciones de sus propiedades. El vínculo entre sus interrelaciones y la manifestación de sus propiedades es el Ciclo Hidrológico, el cual tiene en consideración la distribución del agua bajo y sobre la tierra por causas naturales y humanas. De acuerdo a sus características se subdivide en Hidrología de los océanos (Oceanografía), Hidrometeorología e Hidrología de los continentes o Hidrología Superficial. Esta última se subdivide en Potamología (estudio de las corrientes fluviales), Limnología (estudio de los sistemas acuáticos continentales), Geohidrología (estudio del agua en las rocas y suelos) y Glaciología (estudio del agua en estado sólido), teniendo dos componentes importantes: manejo de los recursos hídricos e hidrometría. La Hidrometría es la ciencia de mediciones y observaciones, mientras que la parte descriptiva de la Hidrología compete a la Hidrografía.

#### Conceptos de Hidrología

##### 3.1 El Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso complejo que depende del clima, de la meteorología, la pedología, tanto como de la morfología de la Tierra. Especial énfasis se le da a la estacionalidad de área geográfica, es decir a la influencia que causan las estaciones del año en la dinámica del ciclo. El objetivo de la Hidrología es descubrir y describir, de forma cuantitativa y cualitativa, todos estos procesos interrelacionados por el ciclo hidrológico, con el fin de representar el comportamiento de las variables hidrológicas en el momento actual o a futuro (pronóstico).

##### 3.2 Balance Hídrico o Régimen Hídrico

El balance describe el ciclo hidrológico en términos cuantitativos con relaciones promedio de las particiones de lluvia a largo plazo (Eagleson 1978a, 1978g). La investigación geofísica describe al ciclo hidrológico como el cálculo estimado de la cuantificación de los procesos, por ello la investigación de los recursos hídricos utiliza la aplicación del balance hídrico para fines de planificación, implicando condiciones de largo plazo.

### 3.1.3 Ecuación fundamental del balance hídrico

La ecuación básica del drenaje de cuencas, más comúnmente conocida como ecuación de continuidad, es:

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3.1)$$

I Lo que entra al sistema

O Lo que sale del sistema

$\frac{\Delta S}{\Delta t}$  El cambio en el almacenamiento debido al tiempo en el sistema

al simplificar la ecuación, haciendo implícito el tiempo en toda su expresión se obtiene:

$$P = Q + ETP + \Delta S \quad (3.2)$$

P (mm) Altura de precipitación (gotas de lluvia  $\phi > 0.5$  mm + nieve) /  $\Delta t$

Q (mm) Altura del caudal /  $\Delta t$

ET (mm) Altura de evaporación /  $\Delta t$

$\Delta S$  (mm) Cambio en el almacenamiento /  $\Delta t$

Por lo general las magnitudes relacionadas con el ciclo hidrológico se expresan en milímetros por unidad de tiempo. Es decir, un milímetro equivale a un litro de agua por metro cuadrado de la proyección horizontal del área de estudio.

### 3.1.4 Ciclo hidrológico de una cuenca drenada

El área de referencia natural para el estudio hidrológico y el manejo de los recursos hídricos, especialmente para la evaluación del ciclo hidrológico es la cuenca (*catchment*) o área de drenaje de una cuenca (*drainage basin*). El límite que separa a dos cuencas contiguas y determina el curso de una gota de agua es conocida como la línea divisoria de aguas (*watershed*).

El área de drenaje de una cuenca (*drainage basin, catchment*) puede ser establecida para la totalidad del río o solamente para uno de sus afluentes (Figura 3.1). El tamaño del área de drenaje es la proyección horizontal del área asignada al caudal de una sección transversal particular. Está inmersa entre la divisoria de aguas (*watershed*) y puede diferir del tamaño de la superficie o subsuperficie del área de drenaje.

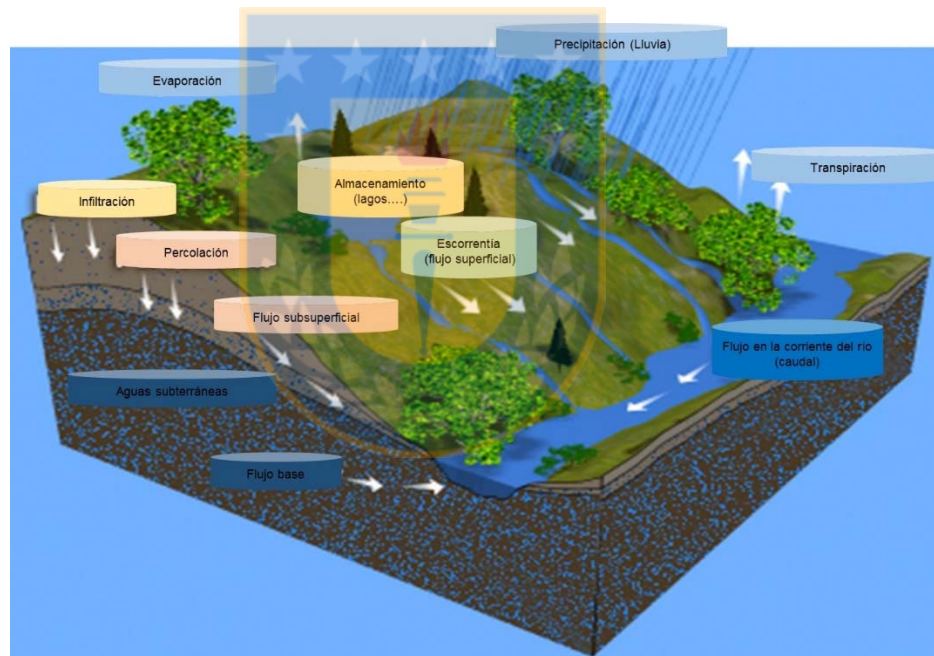


Figura 3.1. Ciclo hidrológico de una cuenca drenada. Adaptado de McDonnell (2013). 4th Aberdeen Catchment Science Summer School. A brief introduction to catchment science.

### 3.2 Principios fundamentales de la modelación de cuencas

El uso y manejo racional<sup>4</sup> del agua está basado en el entendimiento de las características temporales y espaciales generadas por la dinámica del agua. Estas características pueden ser producidas por la naturaleza en áreas sin intervención humana o por el hombre. Ejemplo de la intervención humana en las características del agua es la calidad del agua debido a que los procesos de transporte y transposición tienen lugar dentro del curso de agua, arrastran sustancias generadas por el hombre, alterando la calidad del agua. Calidad y cantidad del agua están relacionadas en todos los cuerpos de agua.

Un modelo hidrológico se utiliza fundamentalmente para la representación de los procesos que ocurren dentro o entre una cuenca hidrográfica, adicionalmente se utiliza para obtener respuesta que coadyuven al manejo de cuencas (Singh, 1989). La utilización de los modelos está restringida por la pregunta de trabajo que se establece por el modelador. Aunque existan innumerables arquitecturas compartidas en los modelos hidrológicos debido al principio de similitud de cada uno de ellos, la respuesta que entrega cada uno de estos posibles modelos es distinta (Singh, 1995, Rivera, 2005).

El modelo es una herramienta que permite transformar datos observados de procesos en información para predicciones de los procesos observados (Wagener, et. al, 2007). La arquitectura de un modelo hidrológico tiene cinco componentes que incluyen:

- (a) la geometría del sistema bajo estudio (cuenca),
- (b) las entradas al sistema,
- (c) las leyes que gobiernan los procesos dentro del sistema,
- (d) las condiciones iniciales del sistema y sus condiciones de borde o frontera, y
- (e) las salidas del sistema.

Dependiendo del tipo de modelo la combinación de estos componentes varía, lo que en conjunto con las características del sistema puede ser descrito en modelos determinísticos y estocásticos. Los últimos hacen predicciones y su variación aleatoria es grande, es decir si el grado de incertidumbre es alto, es mejor utilizar los primeros, dado que se ajustan mucho más

---

<sup>4</sup> Racional se refiere a la cantidad de agua o recurso hídrico definida para consumo, ya sea humano (agua potabilizada) o agrícola (cultivos).

a la realización de pronósticos. En cambio si la incertidumbre que se maneja en la medición (observación) de las variables es baja, es preferible utilizar modelos determinísticos, porque los mismos son capaces de realizar predicciones en base a observaciones (Chow, et. al., 1994). Los modelos determinísticos se dividen por considerarse un punto único en el espacio (agregados, lumped) o por sub-dividirse en varios elementos en el espacio (semi-distribuidos).

Los métodos estadísticos se utilizan para encontrar relaciones geo espaciales de los datos de variables escogidas (elevación y precipitación), mientras que los métodos determinísticos buscan establecer las causas probables expresadas en forma matemática entre las posibles conexiones de variables causantes del efecto. Por ejemplo, el caudal depende de varias variables relacionadas entre sí, aunque, el en sí mismo, sea una causa directa de la precipitación.

### 3.2.1 Conceptualización de escalas

La modelación hidrológica se apoya en la escala que el modelador desea proyectar la información que coincida con las funciones objetivo que ha establecido.

De acuerdo a varios autores (Rose, 2004) la definición de variables a escala de cuencas es determinante en la comprensión del sistema hidrológico a analizar, pues la mayoría de los sistemas que se presentan en la naturaleza están operando dentro de un rango de escalas más o menos amplio según el sistema que se trate (Dooge, 1982). Esto implica que el rango en los procesos hidrológicos es muy amplio, desde un metro cuadrado ( $1 \text{ m}^2$ ) hasta millones de kilómetros cuadrados ( $10^6 \text{ km}^2$ ). Sin embargo, la importancia de esta acotación no radica en los rangos, sino en la comprensión de los procesos dentro de esos rangos (escalas) y el por qué de la respuesta hidrológica en ellas (Blöschl and Sivapalan 1995, Skøien et al. 2003)

A este respecto conocer la dinámica del sistema que regula dicha respuesta en un rango más o menos amplio de escalas, es la base de la transformación de la percepción a la conceptualización. Por consiguiente, la comprensión de las respuestas a escala (Figura 3.1), permitirá extrapolar (uploading) los resultados obtenidos en pequeñas escalas (sencillo) a mayores escalas (complejo). Inclusive si se establecen los límites de extrapolación (dominios de escalas), se identifican los factores que regulan la respuesta hidrológica en cada escala, y

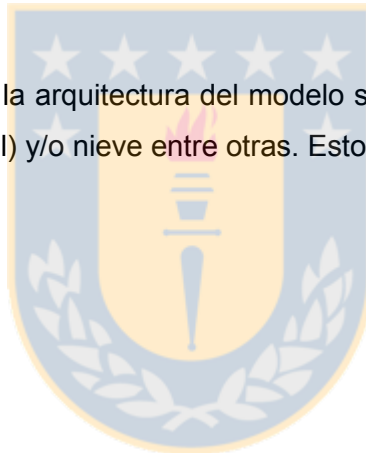


se estima la variabilidad espacial de dichos factores, es posible predecir el comportamiento hidrológico de una zona a partir de los datos obtenidos en una determinada escala de trabajo (Figura 3.2).

### 3.3 Arquitectura de los modelos precipitación escorrentía

El objetivo de un modelo es la determinación del caudal causado por la precipitación dentro de la cuenca. De allí que su estructura se define a través de las interrelaciones de las variables que, en una primera aproximación han sido perceptualmente establecidas por medio de la observación. El modelo conceptual es posteriormente descrito por medio de un número de parámetros (pocos, esencialmente), que generan matemáticamente una correspondencia entre su definición y el sistema natural. Esta correspondencia necesariamente no es medible, ni cuantificable.

Los procesos definidos por la arquitectura del modelo son causados por la precipitación, en forma de agua lluvia (rainfall) y/o nieve entre otras. Estos procesos son:



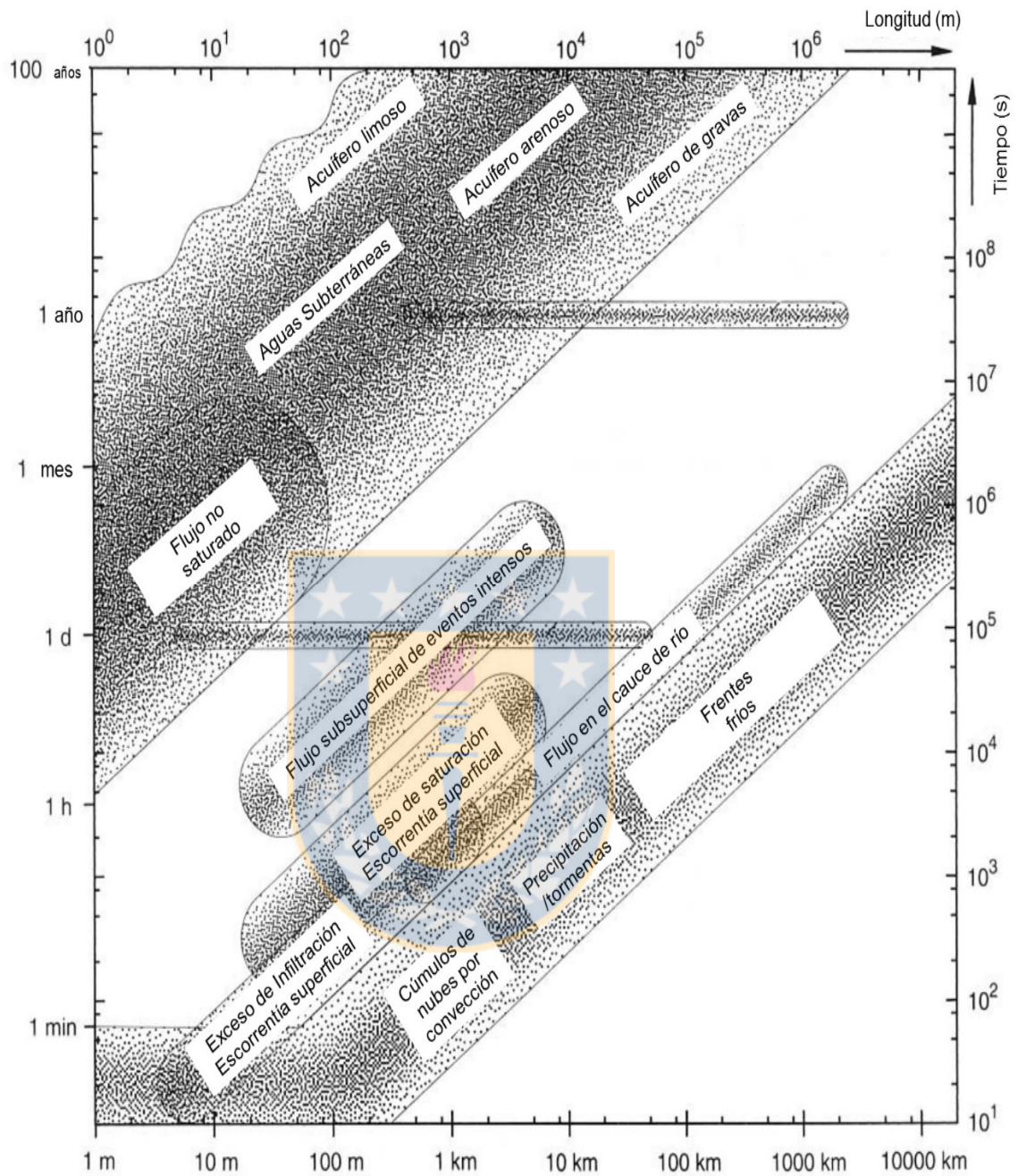


Figura 3.2. Relaciones esquemáticas entre los procesos de escala espacial y temporal. Los rectángulos indican el espacio mínimo y la extensión máxima de la precipitación y de la escorrentía, ambos en escala de tiempo y espacio. Blöschl and Sivapalan 1995, Skøien et al. 2003.

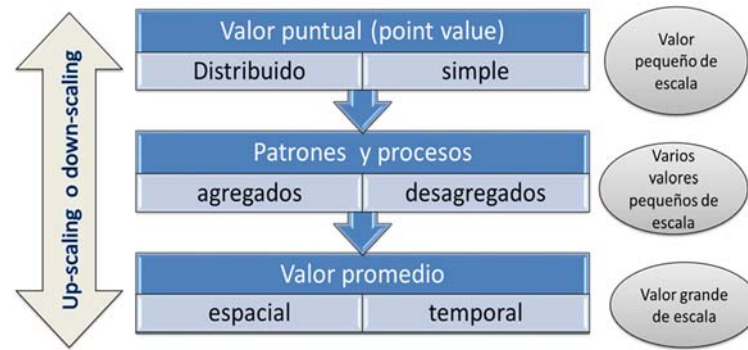


Figura 3.3. Análisis de las relaciones extrapoladas (uploading) de resultados. Iniciando de pequeñas escalas (sencillo) a mayores escalas (complejo), o viceversa. Este downscaling o downscaling permite identificar y estimar la variabilidad espacial de los factores que regulan la respuesta hidrológica en la escala de estudio.

- Evaporación o evapotranspiración (evaporación real)
- Percolación e infiltración
- Flujo de agua subterránea
- Escorrentía

El resultado de las relaciones entre ellos es la señal final del caudal de la cuenca drenada (ver Figura 2.2).

Los modelos hidrológicos que han sido desarrollados a nivel de cuencas, son parte de estudios hidrológicos de áreas geográficas específicas (Ferrer et al. 1973, Bergström 1976, Burnash 1995, Muñoz 2010). No obstante, probar que son aplicables a cualquier cuenca independientemente de su ubicación geográfica, es un tema en discusión (Montanari, 2014). Es por ello, que utilizar dichos modelos como en el descubrimiento o caracterización de los procesos hidrológicos (Thapa 2010, Seibert 2012, AghaKouchak 2013) es una herramienta de aprendizaje eficaz y efectiva en los cursos de hidrología y/o en el manejo integrado de cuencas. Más específicamente, al descubrir qué arquitectura de modelo es aplicable a la cuenca bajo estudio, es posible realizar hallazgos en el comportamiento de sus procesos hidrológicos propios y característicos de ese lugar (McDonnell 2003, McDonnell 2009, Muñoz-Villers y McDonnell 2012), lo que se traduce en investigación científica de y para el lugar (Birkel, 2010). Los cambios en las estructuras de los modelos, inclusive, puede realizarse para que su calibración dependa de un parámetro en especial controlando de esta manera un

proceso hidrológico en específico. En “A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model non-stationarity”, Westra et al. (2014), fijaron en la calibración el proceso hidrológico de almacenamiento de agua un parámetro que controla la curva de recesión y hace dependiente la relación de evapotranspiración. Los autores concluyen que se puede generar una estrategia para el diagnóstico y la interpretación hidrológica, que mejore los modelos hidrológicos, además de su capacidad predictiva bajo condiciones de cambio climático.

### 3.4 Estimación de la señal de respuesta (caudal modelado)

El caudal de simulado de una cuenca es respuesta de la combinación de las expresiones matemáticas que describen los procesos hidrológicos dentro de ellas. Aunque dependiendo del tipo de modelo son más simples o más complejas, la estimación de la respuesta final responde básicamente a cómo convertir la precipitación entrante a la cuenca a través de cada uno de los procesos intermedios dentro de ella. Esto puede lograrse mediante almacenajes lineales o no lineales.

#### 3.4.1 Almacenaje lineal y No lineal

EL diagrama de flujo de un modelo hidrológico básico tiene dos fases como lo muestran las dos siguientes figuras. La primera fase es el entendimiento de los procesos que se deseen representar (Figura 3.3) y la segunda es el procesamiento de esos procesos previa identificación de ellos a través de los datos (Figura 3.4).



Figura 3.4. Fase inicial de la modelación hidrológica precipitación escorrentía. Se deben entender los procesos que se deseen representar previo a la escogencia del tipo de modelo (McDonnell, 2003). De igual manera se deben garantizar que se cuentan con los datos que generen las representaciones de los procesos hidrológicos.

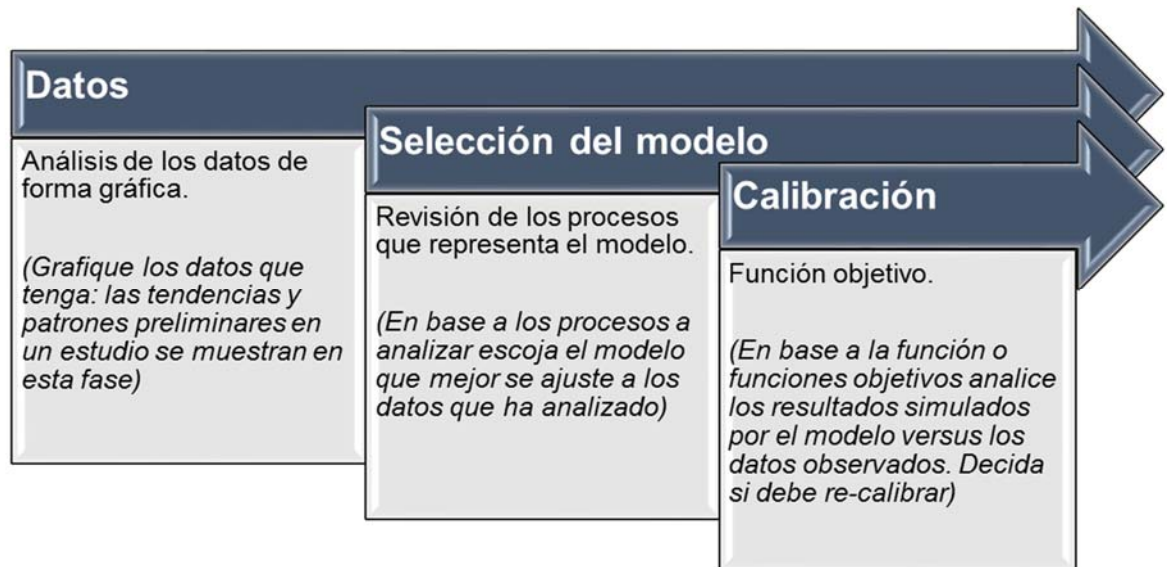


Figura 3.5. Fase de procesamiento de los procesos hidrológicos precipitación escorrentía. Es importante identificar de forma previa a través de los datos que el modelo escogido contará con todos los valores de datos de entrada que requiera el modelo, para garantizar que los valores de salida estarán relacionados con las entradas, previa calibración del mismo.



#### 4. Hipótesis y Objetivo

##### Hipótesis

El flujo subsuperficial es un componente de importancia en el balance interanual de la subcuenca del Río Chagres, en el canal de Panamá, República de Panamá.

Para contestar la hipótesis se plantea:

##### Objetivos

##### 4.1 Objetivo general

Apoyar<sup>5</sup> en el entendimiento del sistema hidrológico en la subcuenca del Río Chagres para coadyuvar en la gestión hídrica del canal.

##### 4.2 Objetivos específicos (ver figura 4.1)

- Determinar la ubicación de las subcuencas con mayor aporte relativo de aguas subterráneas y los períodos de inicio de recarga mediante el uso de la ecuación de balance hídrico y el comportamiento de la anomalía cálida, El Niño (ENSO).
- Desarrollar un modelo conceptual, basado en la geomorfología y litología, que represente el movimiento o cambios en los volúmenes de almacenamiento disponible entre estaciones en la subcuenca del Río Chagres.
- Mejorar el modelo Brown y Ferrer, adaptado por Vega (2009), modificado por Muñoz 2010, para identificar variables dominantes en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Chagres y agregar su parametrización en el modelo hidrológico.

---

<sup>5</sup> Según la Real Academia de la Lengua Española, apoyar significa confirmar, probar, sostener alguna opinión o doctrina.

- Proponer las variables a monitorear en la subcuenca del Río Chagres que coadyuven a la gestión hídrica de la cuenca del canal.

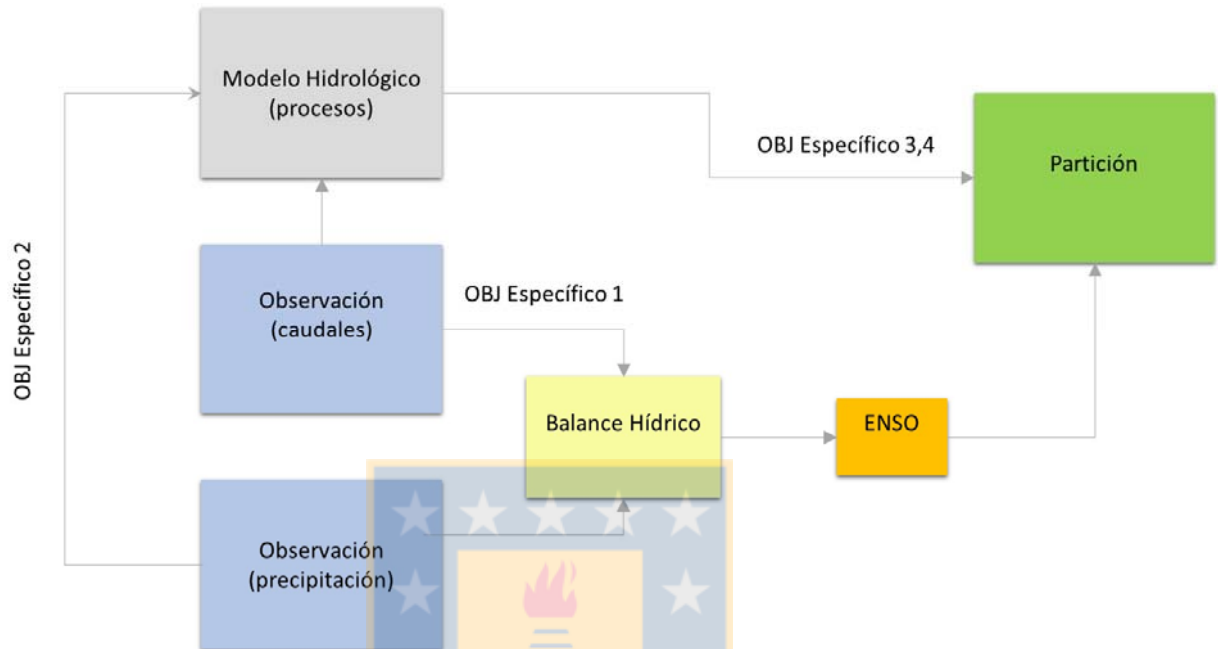


Figura 4.1. Conexiones entre los objetivos específicos de la tesis doctoral.

## 5. Materiales

### 5.1 Área de estudio

La República de Panamá tiene una extensión territorial de 77,400 km<sup>2</sup> (Harmon et. al. 2005) y está dividida en 52 cuencas hidrográficas. Panamá está dentro de la zona intertropical próxima al Ecuador terrestre, entre la latitud 7°11' Norte y 9°39' Norte' y la longitud, 77° 10' Oeste y 83° 03' Oeste, es una franja de tierra angosta orientada de Este a Oeste y es bañada en sus costas por el mar Caribe y el océano Pacífico (Figura 5.1). El Canal de Panamá se ubica en la parte más estrecha del istmo panameño y tiene una extensión de 2,982 km<sup>2</sup>. La cuenca del Canal de Panamá representa aproximadamente el 4% del territorio nacional, y es el resultado de dos lagos artificiales, Gatún y Alajuela. Su afluente principal es el Río Chagres, el cual pertenece a la cuenca alta del Canal de Panamá, que está compuesta por las subcuencas de los ríos Pequení, Boquerón y Chagres (Figura 5.1 a 5.5).

#### 5.1.1 Cuenca del río Chagres

En la actualidad el río Chagres tiene una extensión de 125 km (Figura 5.5), una precipitación promedio de 3380 mm anuales, sobre un área de 444 km<sup>2</sup>, lo que genera un caudal promedio anual de 2355 milímetros. La cuenca del Río Chagres pertenece a la cuenca alta del canal. El rango de elevaciones en la cuenca del canal varía desde el nivel de mar hasta los 1200 metros (Figura 5.2).

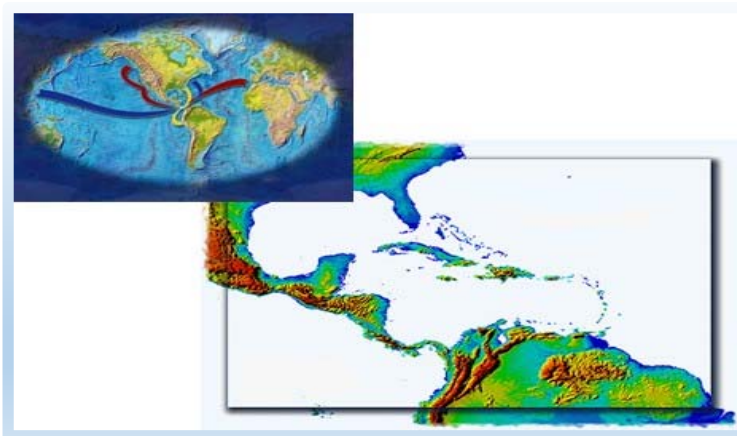


Figura 5.1. Ubicación de la República de Panamá



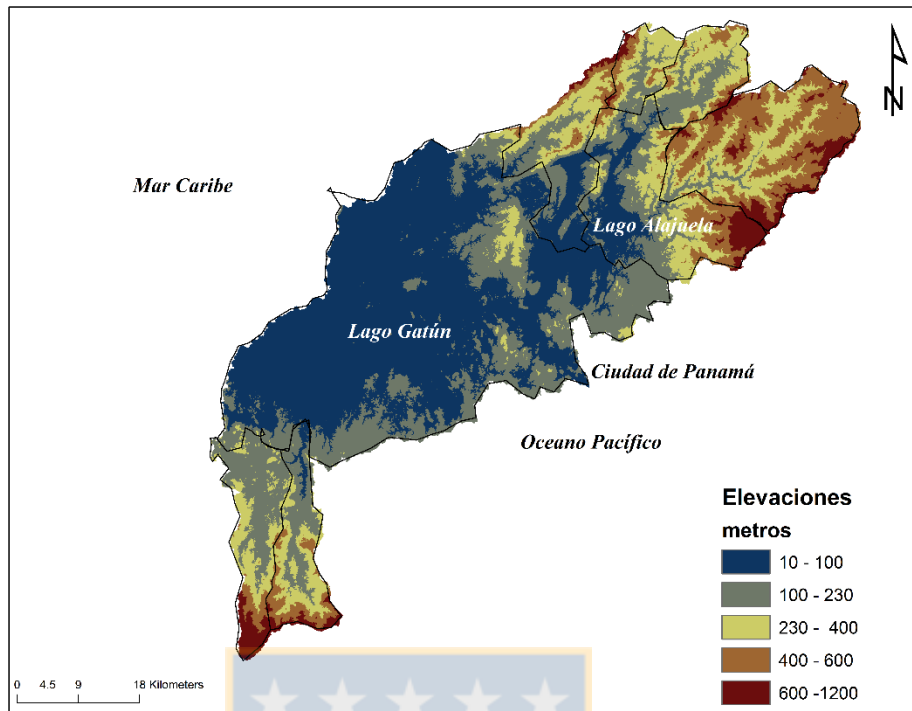


Figura 5.2. Elevaciones del relieve en la cuenca del canal de Panamá

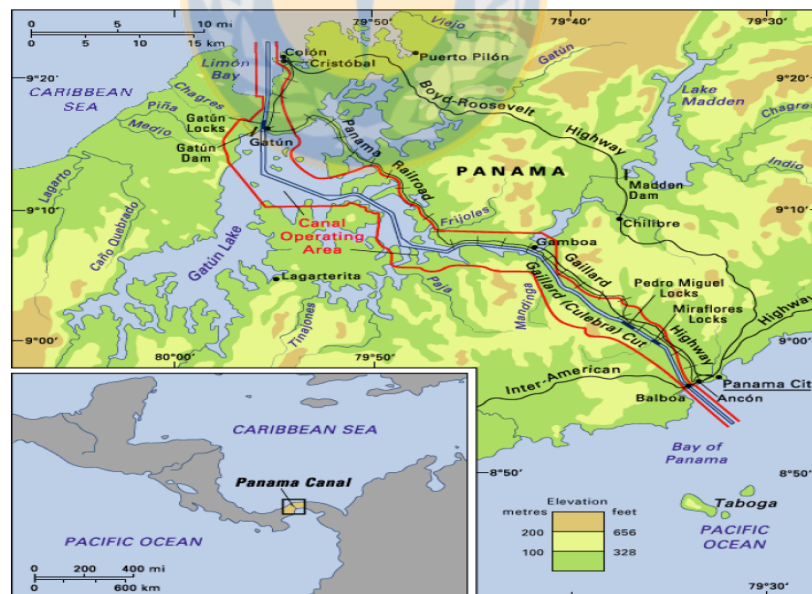


Figura 5.3. Ubicación y extensión del canal de Panamá. Fuente: U.S. Army Corps of Engineers. 2003.

### 5.1.2 Geología y Geomorfología

El análisis de las características físicas de las rocas, en las diferentes formaciones geológicas dentro de la cuenca, determinada por la Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A de la República de Panamá (ETESA, 1999), establece la posibilidad de que los sedimentos aluviales conformen capas acuíferas, y que rocas ígneas calizas fracturadas constituyan redes de flujos subsuperficiales y preferenciales<sup>6</sup>.

Debido a las singularidades del clima tropical, que favorecen la gran pluviosidad en la cuenca del canal, los ríos Chagres, Boquerón y Pequení, se erigen en poderosos agentes de la meteorización química y física, produciendo el labrado y desgaste de una variedad de rocas sedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas (Miranda, 2005) cuyo intemperismo ha modelado el relieve actual.

En la Figura 5.4 Miranda (2005) el Bloque 3, define parte de la geología de la cuenca alta del canal. Se observa que el caudaloso Río Chagres, por su extensa red hídrica, erosiona y expone los estratos de las abruptas montañas intrusivas de la Formación Mamóní, constituida por gabro, diorita, cuarzo dioritas, granodioritas y sienitas, transportando gran volumen de sedimentos desde este Bloque 3, hasta las planicies de la cuenca Terciaria, bañada por el Lago Alajuela. Este movimiento ha labrado los mantos sedimentarios de las formaciones Gatuncillo, Alajuela y miembro marino de la Formación Panamá. Anteriormente, el proceso continuaba hasta alcanzar su destino final en el Mar Caribe (Salida del Chagres, Fuerte San Lorenzo).

El Bloque 1 está limitado por un frente escarpado con laderas de gran pendiente que corresponde a la zona de Falla del Río Gatún, el cual se extiende aproximadamente 26 km con rumbo N 58°-76° E, desde el borde suroeste de esa falla en el Lago Gatún, hasta la unión del Río Boquerón con el Lago Alajuela, al noreste.

---

<sup>6</sup> ETESA recopiló, inventario, sistematizó, normalizó, evaluó, interpretó y sintetizó información de mapas topográficos, mapas geológicos, registros de pozos, informes y documentos; hidrogeológicos, cartográficos, geológicos, de hidrología superficial y de suelos, existentes al año 1999 en la República de Panamá.

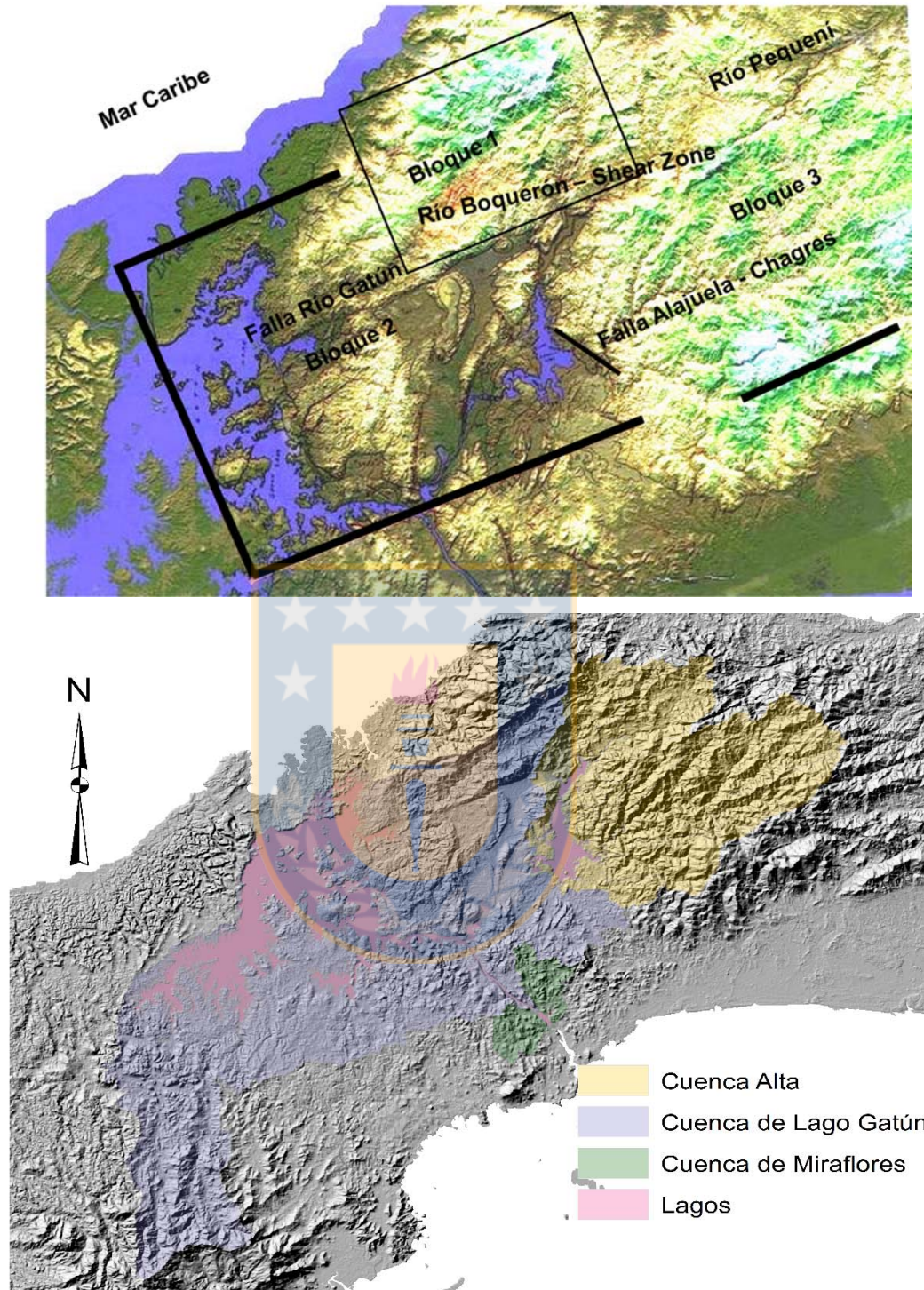


Figura 5.4. Cuenca Alta del Canal, República de Panamá. Arriba: Fallas importantes de la geología. En este estudio su delineación no se refiere a su actividad sísmica, sino a su existencia y relevancia en la formación del relieve (geomorfología) en el área del río Chagres, Boquerón y Pequení. Adaptado de Miranda (2005). Abajo: Bloques en perspectiva de pendientes (Osorio Ugarte, elaboración propia).

La interacción de procesos geológicos de naturaleza volcánica, magmática, metamórfica y sedimentaria, originados por la dinámica de las placas terrestres, produjeron cambios en la superficie del Istmo de Panamá. La meteorización y erosión posterior han sido determinantes para crear y esculpir las relevantes formas del relieve mostradas en el mapa fotogeológico y el geológico de la cuenca alta del canal (Figura 5.5, 5.2, 5.4, 5.6 y 5.7)

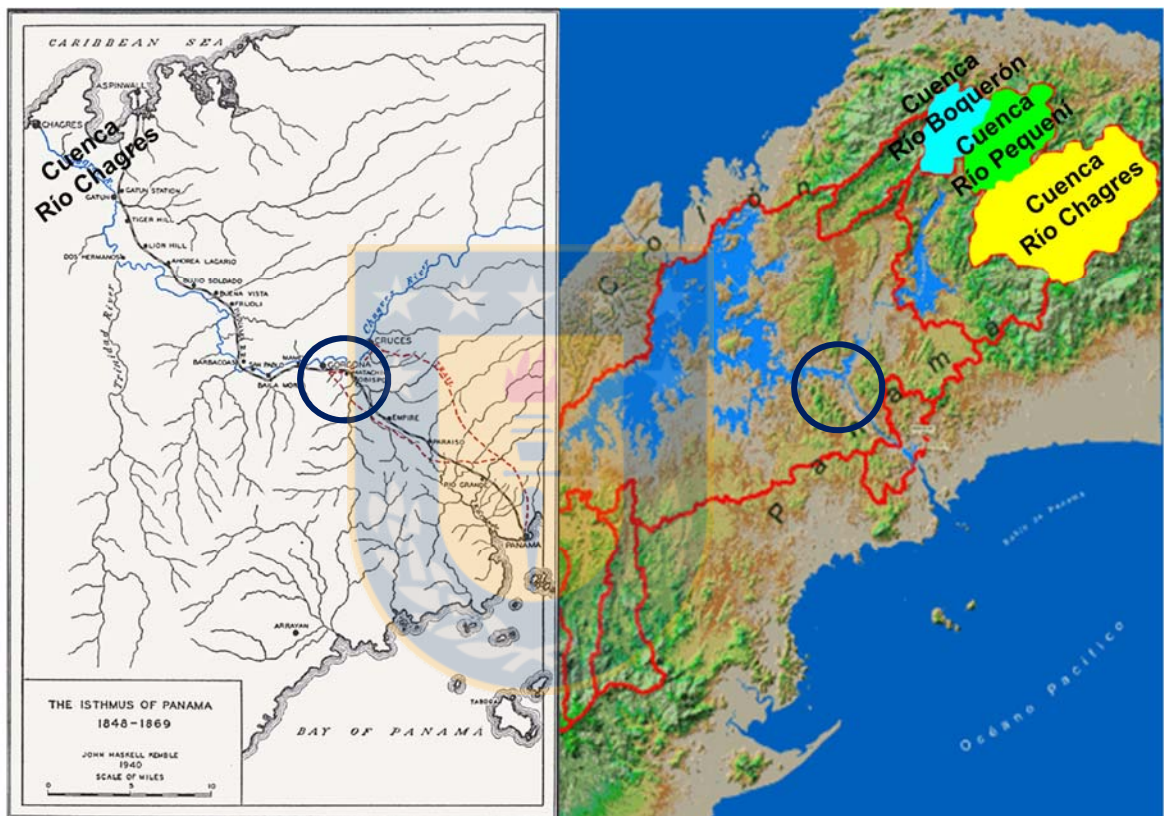


Figura 5.5. Cuenca Alta del Canal, República de Panamá. Izquierda: Cuenca del río Chagres, imagen previa a la construcción del Canal de Panamá. La línea azul marca el cauce principal del río que desemboca en el Mar Caribe. Note la cantidad de afluentes que drenan hacia el cauce principal. Fuente. Google. Derecha: Cuenca Alta del Canal, con subcuencas más importantes, Río Boquerón, Río Pequeñí y Río Chagres después de la creación del lago artificial Gatún y Alajuela (Osorio Ugarte, elaboración propia). En ambas figuras el círculo negro denota el mismo punto de referencia.



Figura 5.6. Imagen de la formación Ocu (K-CHao) en el Río Boquerón. Las capas se extienden y buzan según:  $N14^{\circ}E/20^{\circ}SE$ . Constituyen el miembro inferior calcáreo de la Formación Ocu (Miembro Boquerón) (Miranda 2005).



Figura 5.7. Alineamientos hacia el noreste de los bloques levantados y hundidos a manera de gradas, que sugieren movimientos verticales por fallas.

Como dato importante, se menciona que los basaltos cubren en general el área de la cuenca alta del canal, sin embargo, al noreste de la cuenca del Canal de Panamá, la cual está constituida por rocas sedimentarias y piroclastos, es subyacida por otra formación volcánica conformada por flujos basálticos y andesíticos (Miranda 2005); lo que propicia el drenaje o conexiones subsuperficiales



Figura 5.8. Cambios en la corriente aguas arriba del Río Chagres. Izquierda. Se observa el pasaje oblicuo de las rocas a través del río y las diferencias en el canal del río debido a su topografía. Las orillas que se aprecian aún están en transición. Derecha. Se observa el knickpoint en el canal. La cabeza de flecha marca la dirección del río (hacia aguas abajo).

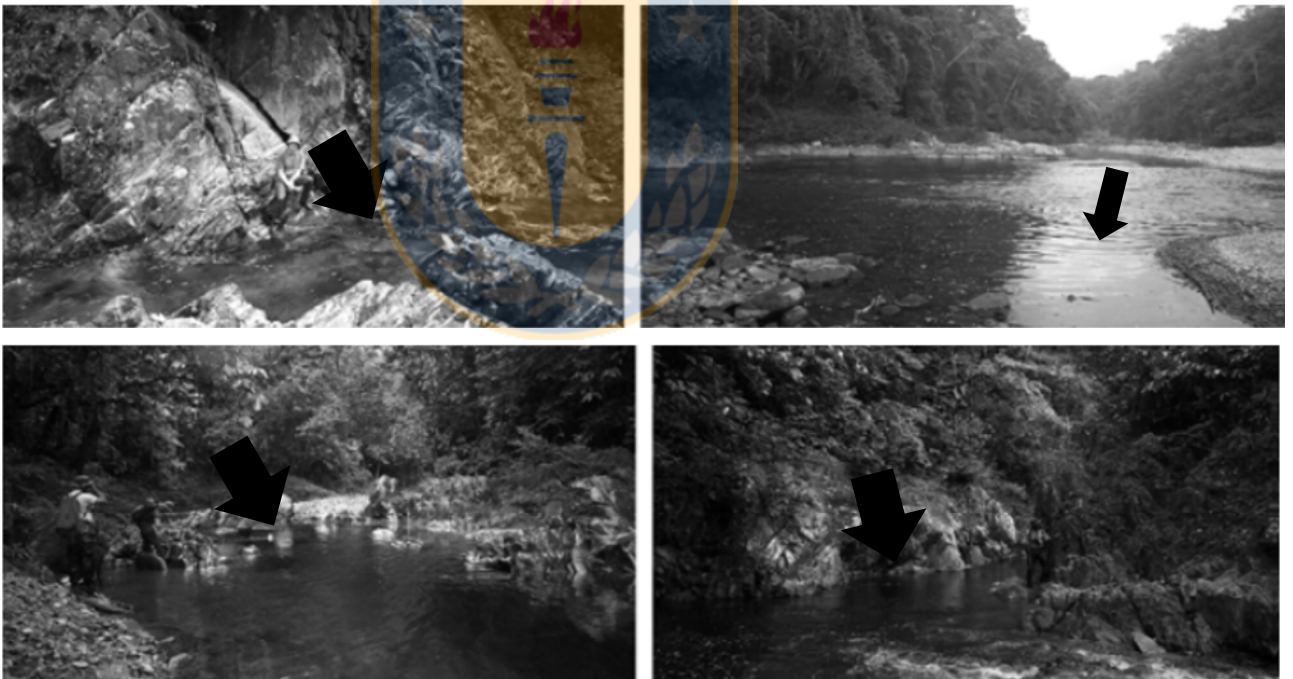


Figura 5.9. Ejemplos de litologías típicas observadas a lo largo del Río Chagres y sus tributarios. Se aprecian basaltos, en diques, granitos, algunas secciones del río en complejos máficos y las tonalidades oscuras de granitos. Harmon et al. 1995. La cabeza de flecha marca la dirección del río (hacia aguas abajo).

### 5.1.3 Climatología

En la República de Panamá el clima se caracteriza por una estación seca y una estación lluviosa. La primera ocurre entre los meses de diciembre a abril, y la segunda de mayo a noviembre. Los inicios de cada estación dependen del comportamiento del clima en la zona. En un año seco la precipitación media anual en la cuenca alta del Canal puede alcanzar valores de 2232 mm, y en un año húmedo valores sobre los 4701 milímetros. La variabilidad temporal del régimen de precipitación en las cuencas Norestes es más marcada que en las cuencas del Suroeste (Figura 7.2). Lo anterior, asociado a la geología del área, permite inferir que el flujo sub-superficial juega un papel importante y clave en la escorrentía del área, provocando caudales extremos durante la estación lluviosa (Niedzialek, et. al, 2005). Las rocas del área al ser impermeables se comportan como una superficie lisa, eso asociado al alcance de la humedad máxima en el suelo en lluvias copiosas, propicia la acumulación de la escorrentía superficial de forma rápida en el cauce del río, provocando crecidas en periodos cortos de tiempo. En el año 1989, la magnitud de la media mensual de la lluvia fue de 278 mm. El mes más lluvioso fue Noviembre con 486 mm y durante la estación seca el mes más seco fue de 18 mm.

### 5.1.4 El Niño Oscilación del Sur

El término Fenómeno del Niño se refiere a un evento de la Variabilidad Climática que se produce por la interacción de las condiciones del océano y la atmósfera en el océano Pacífico Tropical. Al fenómeno también se le conoce como El Niño Oscilación del Sur (ENSO). El Niño se refiere a la componente oceánica y la Oscilación del Sur se refiere a la componente atmosférica.

La componente oceánica se refiere al calentamiento o enfriamiento de las aguas del Pacífico Tropical. En el caso de calentamiento de las aguas del Pacífico Tropical, se marca la fase cálida o evento El Niño y en el caso de un enfriamiento o fase fría, La Niña.

La componente atmosférica está representada por el Índice de Oscilación del Sur (IOS), este índice fue definido por Sr. Gilbert Walker (Director General del observatorio Inglés en la India, 1924) y está dado por la diferencia de Presión en el Pacífico Occidental y la Presión en el Pacífico Oriental Central.

Una de las variables de mayor importancia en el monitoreo del Fenómeno del Niño es la temperatura de la Superficie del Mar en el océano Pacífico Tropical. Es por esto que esta zona del océano se ha dividido en 4 regiones las cuales son monitoreadas constantemente para diagnosticar y pronosticar la evolución de El Niño. En la figura 5.9 se aprecia el comportamiento asociado a probabilidades del ENSO para el año 2014 – 2015 en Panamá.



Figura 5.10. Ubicación de las regiones El Niño. Fuente: ETESA, Panamá.

Efectos de El Niño en Panamá y las condiciones medias que se pueden esperar durante la ocurrencia de un evento El Niño:

- a) En la lluvia: disminución de las lluvias en las regiones ubicadas en la vertiente del Pacífico y un aumento al oeste del Caribe panameño. Este comportamiento puede presentar variaciones locales asociadas a la orografía del lugar y a la intensidad del evento.
- b) En la temperatura del aire: aumento en la temperatura media y aumento en la temperatura máxima.



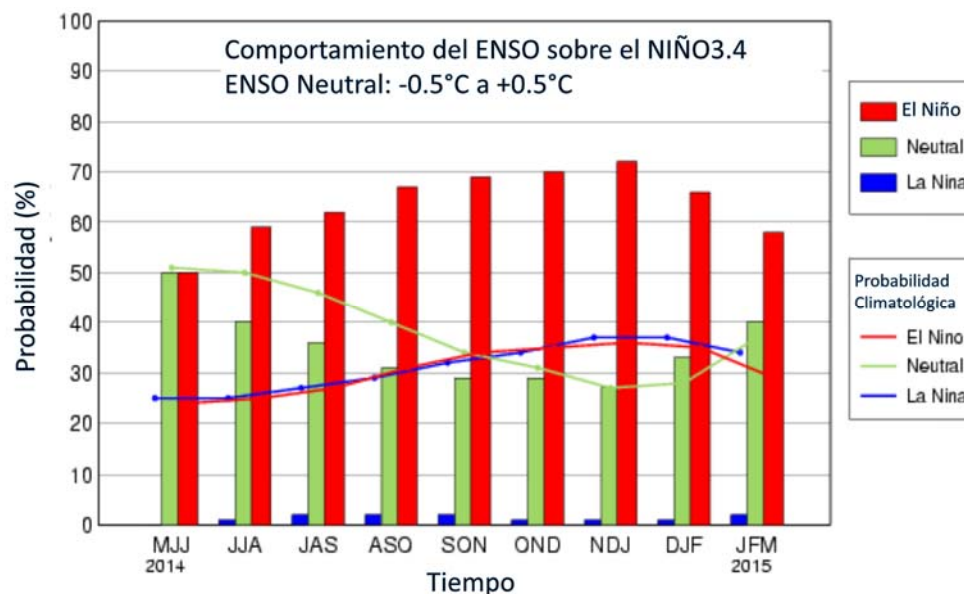


Figura 5.11. Comportamiento del ENSO sobre el NIÑO3.4. Adaptado de International Research Institute for Climate and Society (IRI) y ETESA, Panamá.

### 5.1.5 Vegetación y Uso de Suelo

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas o cubiertas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales, áreas cubiertas por bosques naturales. En algunos casos, al clasificarlas, se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la intervención humana sobre la cobertura vegetal natural. Constituyen un elemento esencial en los ecosistemas; las plantas absorben y reciclan nutrientes, dióxido de carbono, nitrógeno, azufre y fósforo que están en la atmósfera, absorben agua de los suelos y transpiran parte de ella, purificando el aire. Son parte del fundamento básico de la cadena de alimento que sustenta la vida y proveen al ser humano de materiales industriales, plantas medicinales, fibras y resinas.

En el caso específico de los bosques, estos juegan un papel importante en la conservación del medio ambiente, ya que regulan las corrientes de agua, tienen un efecto moderador en el clima a escala global y local, y favorecen la conservación de los suelos previniendo la erosión. Además, son el habitat de numerosas especies de plantas y animales que se encuentran amenazadas.

## **Cuenca del Río Chagres**

En el año 2006, la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), realizó un estudio de la cobertura boscosa y vegetación existente en varias cuencas del canal de Panamá. Este estudio incluyó la cuenca alta del canal. El estudio determinó que en la cuenca del río Chagres la estructura de la vegetación consiste en un bosque maduro. Se observan claros naturales, producto de la caída de los árboles viejos. En estos claros se presenta una regeneración natural, en donde la vegetación del sotobosque aprovecha la luz del sol para crecer y ganar altura. Existe una especie de árbol dominante conocida como poroso o chiricano (*Ventanea depleta* - Chiricano), especie de dosel, característica del bosque maduro.

La parcela de muestreo tuvo una cobertura del dosel promedio de 91,15 %. Los árboles estudiados tienen un diámetro a la altura del pecho o diámetro de referencia a 1.3 m (DAP) promedio de 52,63 cm y una altura promedio de 25,75 m. El 60 % de los individuos presentan una altura > 23 m y el 93% de los individuos un DAP > 20 cm.

En la estación Chico se encontraron 116 individuos distribuidos en 46 especies. Las especies más comunes fueron *Vantanea depleta* – Chiricano (36), *Tapirira guianensis* – Caobilla (11) y *Xylopia frutescens* – Malagueto macho (7).

El área donde está ubicada la parcela corresponde a un bosque semideciduo tropical de tierras bajas, según el mapa de vegetación de Panamá (ANAM, 2000). La zona de vida, según Holdridge (1979), corresponde a un bosque húmedo tropical.

**Características geológicas y físicas:** La parcela de la estación Chico descansa sobre rocas volcánicas y diorita; clorizadas, carbonizadas, con fracturas, venas de calcita y zeolita. Se encuentra a aproximadamente 162 msnm; presenta una temperatura promedio de 26°C, precipitación de 2646 mm/año, evapotranspiración potencial (ETP) de aproximadamente 880 mm/año y una humedad relativa de 83%.

De acuerdo a información reciente sobre el uso actual del suelo en la subcuenca del río Chagres, se tiene que la cubierta boscosa (bosques maduros y secundarios) representa aproximadamente 97.4% de dicha subcuenca, en tanto que áreas intervenidas como; matorrales y rastrojos, paja canalera, pastizales, centros poblados y suelos desnudos, ocupan el 2.4% de la subcuenca del Chagres. Ilustración en la Figura 5.11.

Tabla 5.1. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Chagres. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).

Uso	Superficie (km <sup>2</sup> )	% del total
Bosques maduros	713,3	72,4
Bosques secundarios	123,5	12,5
Matorrales y rastrojos	66,7	6,8
Áreas pobladas	0,4	0,04
Paja canalera	12,2	1,2
Actividades pecuarias / pastizales	25,0	2,5
Áreas inundables	35,9	3,86
Suelos desnudos	7,0	0,7
<b>Totales</b>	984	100 %

La cuenca del río Chagres tiene una extensión de 414 km<sup>2</sup>

### Cuenca Río Pequení

En el caso de esta cuenca, el estudio de la cobertura boscosa y vegetación realizado en 2006 por la ACP, determinó que del total de 16,485.8 hectáreas de esta subcuenca, los lugares poblados ocupan 3.3 hectáreas. Hay además algunas áreas inundables cerca de la desembocadura del río Pequení en el lago Alhajúela y cubren unas 20 hectáreas.

La actividad ganadera y los pastizales cubren alrededor de 230 hectáreas, lo que representa menos del 2%, mientras que los rastrojos y los matorrales representan el 1% del total. Algunas áreas de matorrales son antiguas fincas ganaderas que fueron abandonadas hace más de 5 años, por lo que se encuentran en avanzado estado de recuperación.

La mayor parte del territorio (85%) está cubierta por bosques maduros, mientras que otros 12% tiene bosques secundarios. La principal razón de este porcentaje de áreas boscosas son las actividades de conservación del Parque Nacional (PN) del río Chagres. Hay una porción de 100 hectáreas que está cubierta por la paja canalera, en las cuales la ACP está desarrollando actividades de reforestación utilizando especies nativas con el fin de recuperarlas y reconvertirlas en áreas boscosas.

La descripción de los árboles es similar a la cuenca del río Chagres porque el Río Pequení forma parte del Parque Nacional Chagres. Ilustración en la Figura 5.11.

Tabla 5.2. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Pequení. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).

Uso	Superficie (ha)	% del total
Bosques maduros	13,967.	84.8
Bosques secundarios	1,986.	12.1
Matorrales y rastrojos	143.2	0.9%
Áreas pobladas	3.3	0.0%
Paja canalera	100.7	0.6%
Actividades pecuarias / pastizales	232.5	1.4%
Áreas inundables	19.9	0.1%
Suelos desnudos	12.5	0.1%
<b>Totales</b>	<b>16,465.8</b>	<b>100%</b>

La cuenca del río Pequení tiene una extensión de 135 km<sup>2</sup>

### Cuenca Río Boquerón

En el caso de esta cuenca, el estudio de la cobertura boscosa y vegetación realizado en 2006 por la ACP, determinó que del total de 10,179.4 hectáreas de esta subcuenca, los lugares poblados solo ocupan 1.3 hectáreas, es decir apenas el 0.0001%. Los sitios donde anteriormente operaban minas de manganeso hoy son suelos al descubierto que poco a poco se han ido recubriendo de vegetación y representan 9.5 hectáreas. Las áreas inundables se encuentran cerca de la desembocadura del río Boquerón en el lago Alhajuela y cubren poco menos de 15 hectáreas.

La actividad ganadera y los pastizales cubren alrededor de 300 hectáreas, lo que representa 2.9%, mientras que los rastrojos y los matorrales representan el 12.2% del total. Algunas de estas áreas de matorrales se encuentran en avanzado estado de recuperación y en pocos años podrían considerarse como bosques secundarios.

La actividad ganadera y los pastizales cubren alrededor de 300 hectáreas, lo que representa la mayor parte del territorio (82.7%) está cubierta por áreas boscosas, ya sean bosques maduros o secundarios. Esto es consecuencia directa de las actividades de conservación del

PN Chagres. Hay una porción de casi 200 hectáreas que está cubierta por la paja canalera. En estas áreas, la ACP está desarrollando actividades de reforestación.

La descripción de los árboles es similar a la cuenca del río Chagres porque el Río Boquerón forma parte del Parque Nacional Chagres. Ilustración en la Figura 5.11.

Tabla 5.3. Porcentaje de usos de suelo y cobertura vegetal cuenca del Río Boquerón. Estudio de cobertura vegetal de la cuenca del canal de Panamá, ACP (2006).

Suelos

Uso	Superficie (ha)	% del total
Bosques maduros	5559.	54.6
Bosques secundarios	2859.	28.1
Matorrales y rastrojos	1241.	12.2
Áreas pobladas	1.3	0.0
Paja canalera	196.4	1.9
Actividades pecuarias / pastizales	297.4	2.9
Áreas inundables	14.7	0.0
Suelos desnudos	9.5	0.0
<b>Totales</b>	<b>10179.4</b>	<b>100.0%</b>

La cuenca del río Boquerón tiene una extensión de 91 km<sup>2</sup>

La Figura 5.10, tomada de Harmon et al. (1995), muestra las raíces de algunos de los árboles de la cuenca alta del canal. En la figura se aprecia que las raíces juegan un rol importante en el flujo sub superficial, conectando el flujo superficial a través de los pasos preferenciales creados a través de los canales originados por ellas. En el caso de la cuenca alta del canal, un árbol puede llegar a medir hasta 40 metros de altura, generando para su extracción de agua raíces con diámetros de 2 pulgadas (5 centímetros). No existe, a conocimiento de esta investigación, una descripción más detallada del tipo y características de los suelos de la cuenca alta del canal.

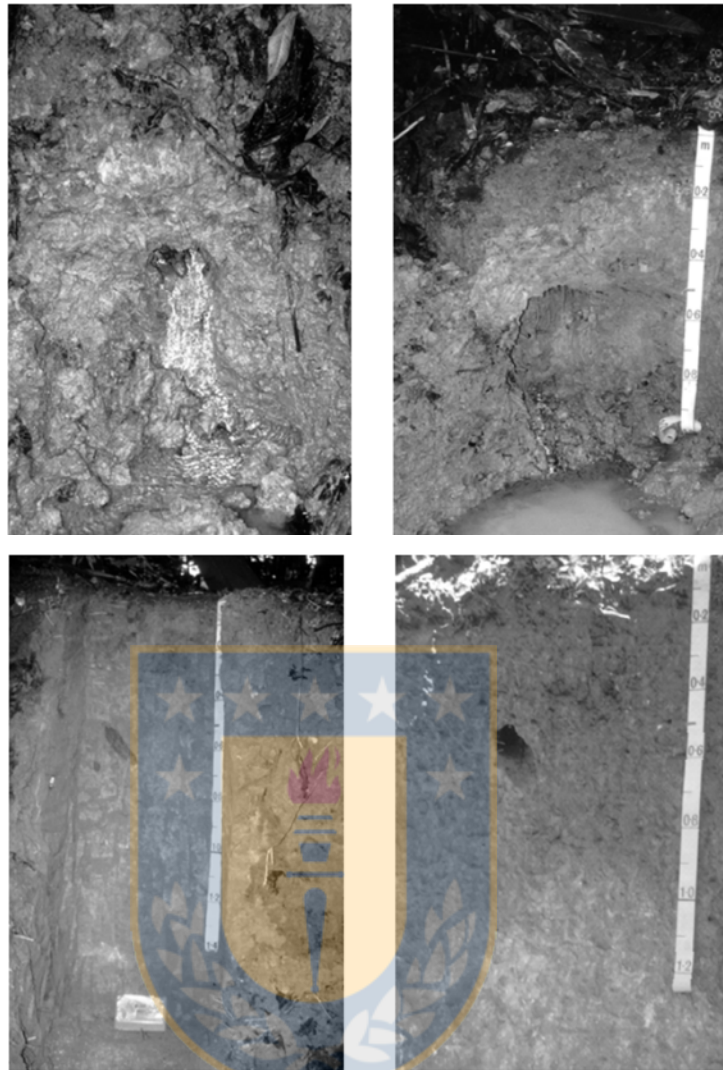


Figura 5. 12. Flujos preferenciales originados por las raíces de los árboles en el río Chagres, cabecera. Arriba: Se aprecia en la imagen como fluye el agua a través del orificio. Abajo: Se aprecia Tamaño del orificio en pulgadas. Harmon et al. 1995.

## 5.2 Datos

### Hidrología y meteorología

La serie de datos hidrológicos y meteorológicos es suministrada por la Autoridad del Canal de Panamá (ACP). Las series seleccionadas para esta tesis doctoral, comprenden el comportamiento de la cuenca alta del canal desde los años 1972 a 1997. La escala temporal es diaria en un área de 400 km<sup>2</sup>

En el año 2002, según el Anuario Hidrológico de la ACP, red de estaciones hidrometeorológicas operadas por la ACP constaban de 59 estaciones (Figura 5.11). La mayoría de ellas telemétricas que registran y transmiten datos de diferentes parámetros en tiempo real: elevaciones de los ríos (16), elevaciones de los lagos (10), niveles de las mareas (2), precipitaciones (54), temperatura del mar (2) y datos meteorológicos como temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación solar total y presión barométrica (8).

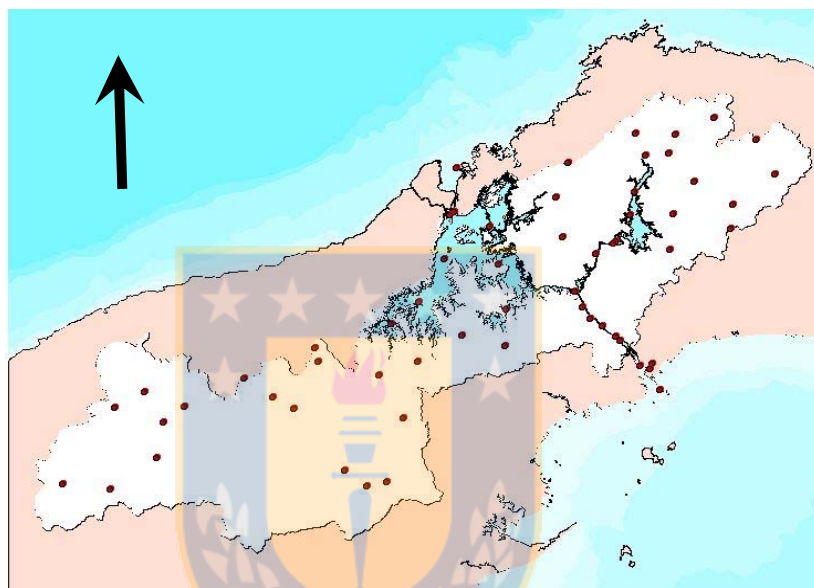


Figura 5. 13. Red de estaciones meteorológicas en la cuenca del canal de Panamá.

Adicionalmente se realizaban aforos una vez por mes en ocho estaciones para medir sedimentos suspendidos en seis. Además se realizaba un control de parámetros de calidad de agua en 26 sitios permanentes ubicados en ríos y lagos.

Estaciones de caudales de los tributarios al Lago Gatún y al Río Chagres. Las series seleccionadas para esta tesis doctoral, comprenden el comportamiento de la cuenca alta del canal desde los años 1972 a 1997

<b>Tributario</b>	<b>Años</b>
Chagres	1966-2005
Río Gatún	1971-2005
Río Ciri Grande	1978-2005
Río Trinidad	1971-2005
Río Boquerón	1971-2005
Río Pequení	1971-2005

### Datos Meteorológicos

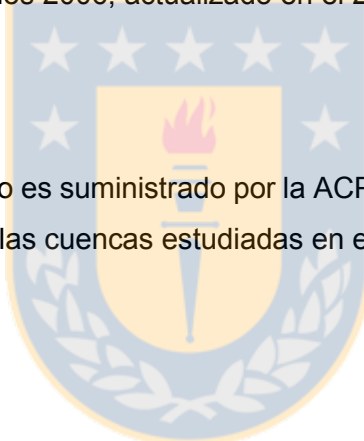
<b>Data Meteorológica Horaria</b>	
Temperatura	Velocidad del viento
Punto de rocío	Dirección del viento
Presión	Radiación solar
Humedad	Evaporación

### Vegetación, uso suelo y geología

Los mapas de cobertura boscosa y de la geología de la cuenca alta del canal, aplicables al periodo de estudio de esta investigación doctoral, son suministrados por la ACP, en una resolución anual para los años 2006, actualizado en el 2008.

### Modelo de elevación digital

El DEM del área bajo estudio es suministrado por la ACP con una resolución de 30 metros por 30 metros. Solamente para las cuencas estudiadas en esta Tesis Doctoral.





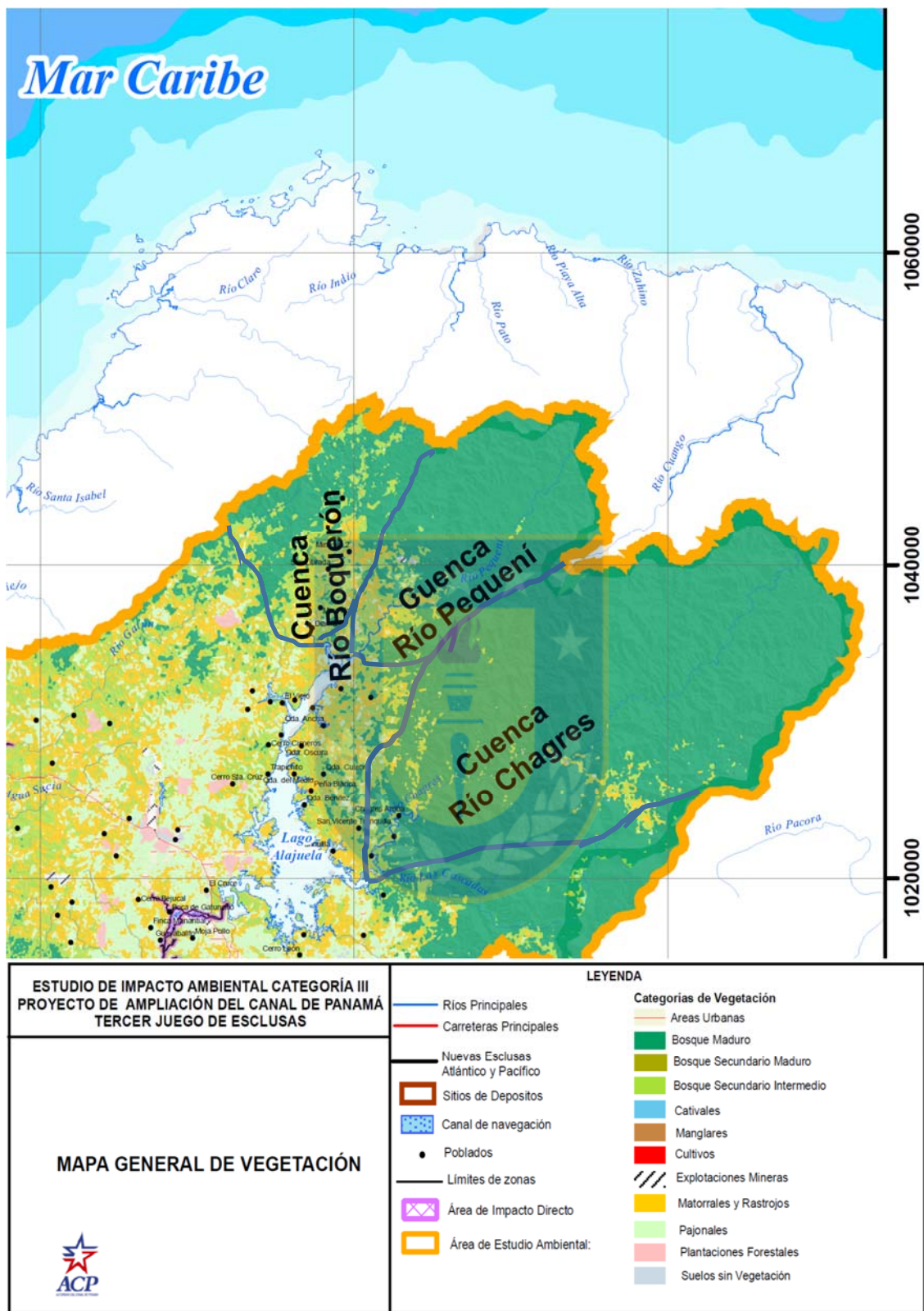


Figura 5.14. Cobertura vegetal cuenca alta canal de Panamá. ACP 2008.

## 6. Metodología

El objetivo específico “Determinar la ubicación de las subcuencas con mayor aporte relativo de aguas subterráneas y los períodos de inicio de recarga mediante el uso de la ecuación de balance hídrico y el comportamiento de la anomalía cálida, El Niño” se alcanzó siguiendo un enfoque de información macro a micro. Primeramente se estimó la variación espacial de la precipitación para establecer la ubicación de las cuencas donde los valores de la lluvia generaban los caudales más importantes al canal y posteriormente se calculó el balance hídrico sobre esas cuencas con análisis anuales y mensuales, el downward approach y el análisis de la curva de recesión para identificar patrones de comportamiento que coincidieran con la presencia de la anomalía cálida, El Niño. La secuencia utilizada en el método está descrita bajo el punto 6.1 y sus subtítulos.

### 6.1 Estimación del balance hídrico (OE1)

EL balance hídrico se realizó sobre la extensión total de cada subcuenca. Incluyendo desde el nacimiento del río que la genera hasta los puntos previos de entrega para usos operativos del canal. La variación de volúmenes en cada subcuenca, utilizó como entradas al sistema el volumen de lluvia sobre la subcuenca calculadas en forma geodistribuida; y como salidas del sistema la evapotranspiración, la Infiltración de lluvia y el escurrimiento aguas abajo.

La ecuación 3.2 se despejó y se obtuvo:

$$\Delta S = P - Q + ETP \quad (6.1)$$

P (mm) Altura de precipitación (gotas de lluvia  $\phi > 0.5$  mm + nieve)

Q (mm) Altura del caudal

ET (mm) Altura de evaporación

$\Delta S$  (mm) Cambio en el almacenamiento

donde,  $\Delta S$  es liberado como aguas sub superficiales

Sobre el supuesto de que las entradas de agua debidas a la precipitación en cada uno de subsistemas es mayor que sus salidas se realizaron cálculos preliminares para el balance hídrico, donde  $\Delta S$  es simplificado al sustraer P menos Q. Se obtuvieron valores positivos en cada una de las subcuencas.

Queda, entonces establecido que de no cumplirse en todos los subsistemas, esta inconsistencia se consideraría una primera aproximación a los patrones de liberación de aguas subsuperficial en las subcuencas analizadas. De esta manera se identificaron las cuencas donde el cambio en el almacenamiento era un proceso dominante.

#### A. Estimación de la precipitación de forma geodistribuida.

El análisis espacial de la precipitación se realizó con el método del External Drift Kriging. Kriging es el nombre genérico de un conjunto de técnicas que son utilizadas para estimar el valor de una variable en puntos donde ésta no ha sido medida. En su expresión más simple, el Kriging puede examinar las propiedades del área y de un evento de lluvia a través de la interpolación. Su cálculo es la suma lineal de los pesos asignados a datos medidos. Los pesos asignados son derivados del variograma o de la covarianza del modelo escogido para representar el fenómeno bajo interés. El variograma describe la variabilidad espacial de un parámetro específico. De esta manera los pesos para determinar la precipitación en un punto se estiman en relación su variabilidad espacial. La estimación de los datos con Kriging va mucho más allá que los resultados de técnicas simples como la vecindad más cercana (nearest neighbour) o el peso de la distancia inversa (inverse distance weighting) pues el Kriging aproxima la estructura espacial del fenómeno, y utiliza el análisis aleatorio en su algoritmo, en cambio los otros métodos no geospaciales solo de apoyan en los valores de las estaciones pluviométricas y dan los mismos resultados para diferentes eventos de lluvia. El Kriging sirve para diseñar redes de estaciones porque incluso da un error asociado a los cálculos.

##### A.1 Variantes del Kriging

Una de las variantes es el ***Kriging con la tendencia del Kriging universal***. Esto quiere decir que en vez de asumir un **proceso estacionario**<sup>7</sup> de la variable, es decir que sus parámetros

<sup>7</sup> proceso estocástico cuya distribución de probabilidad en un instante de tiempo fijo o una posición fija es la misma para todos los instantes de tiempo o posiciones.

tales como la media y la varianza, si existen, no varían a lo largo del tiempo o la posición, incorpora el efecto de la tendencia en la media local. Es decir, este algoritmo genera la tendencia espacial del modelo por medio de la resolución de una función polinomial de los datos locales. De forma alternativa, la tendencia puede ser suministrada de forma externa por una variable secundaria.

La geo estadística está basada en observaciones o en suposiciones (*assumptions*) de correlación espacial. Es decir, que las mediciones tomadas en lugares o puntos cercanos son más probables de tener valores similares que con aquellas que son tomadas en puntos más lejanos. Los semi variogramas, usualmente variogramas para estudios no geo estadísticos, son la principal herramienta usada en geo estadística para cuantificar el cambio en la correlación.

Al incrementarse la distancia el variograma debe ser definido como la mitad de la varianza del incremento de la función aleatoria. De allí el nombre de semi-variograma.

## A.2 Kriging con External Drift

Este método es un caso muy particular del *Kriging con la tendencia del Kriging universal*. El mismo permite la predicción de la variable en cuestión, por lo general conocida como  $Z$ , conociendo solamente un pequeño conjunto de puntos del área bajo estudio. Esto, a través de otra variable que sea conocida de forma exhaustiva dentro del área de estudio ( $s$ ). Así se define una función aleatoria para  $Z$  como  $Z(x)$  y una variable determinada (determinística)  $s(x)$ . Ambas se asume que están relacionadas de forma lineal. De allí, el por qué se utiliza la relación entre relieve (coordenadas) y precipitación, para interpolación de datos no conocidos del régimen lluvioso.

### 6.1.1 Estimación de la evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración (ET) representa la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida

contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos/árboles pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera. Ambos procesos dependen del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo.

A la simultaneidad de estos dos procesos se les conoce como evapotranspiración (ET).

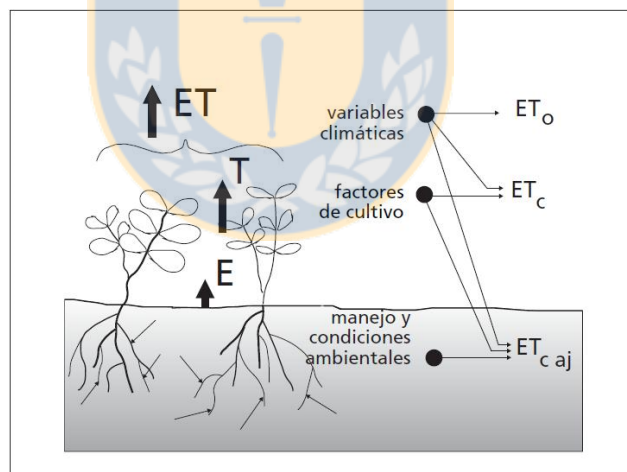


Figura 6.1. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. (FAO 56).

Las variables climáticas se refieren a los parámetros del clima que afectan la evapotranspiración ellos son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Las variables de clima pueden ser expresadas en evapotranspiración del cultivo de referencia, es decir la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar.

Los factores de cultivo se relacionan con la variedad y la etapa de desarrollo, por eso cuando se manejen grandes áreas de cultivos, su cuantificación toma un interés elevado. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en cultivos que sean desarrollados en condiciones ambientales idénticas

Las prácticas de manejo y condiciones del mismo, toman elevado valor ya pueden afectar los microclimas de los cultivos, lo que cambiaría su capacidad de absorción del agua en el suelo.

### Evapotranspiración Potencial

El concepto de evapotranspiración potencial fue definido por Thornthwaite (1948), como la evapotranspiración potencial como el máximo de evapotranspiración que depende únicamente del clima. Según Thornthwaite no hay ninguna restricción de agua en el suelo y su magnitud depende exclusivamente del clima. Para su evaluación no se definió la superficie evaporante. Penman (1963) define la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua transpirada por un cultivo corto de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin restricción de agua. Otros autores, definen la evapotranspiración potencial como la cantidad de agua que se necesita para obtener una vegetación o un rendimiento cercano al óptimo. Autores que utilizan en sus formulaciones el concepto de evapotranspiración potencial ETP son: Thornthwaite, Penman, Papadakis, Turc. (Almorox 2003)

En posteriores investigaciones se observó que el valor de la ETP no representa la capacidad evaporativa máxima. Se ha comprobado como en zonas áridas y semiáridas la evapotranspiración en algunos cultivos de mayor porte como el maíz, girasol, alfalfa, sorgo, es superior a la estimada con la ET medida en un césped, lo que aconsejaba utilizar otro concepto. Esto llevó a introducir el concepto de evapotranspiración de referencia (ET<sub>r</sub>).

### **Modelo Penman-Monteith en la cuenca alta del canal (CRCH)**

Utilizando el método Penman-Monteith (ASCE, 2005) y aplicando los valores observados de la estación Vistamares, se calcularon las variables de presión de vapor, radiación neta, parámetros de la ecuación, las constantes de numerador C<sub>n</sub> en K mm S<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> y C<sub>d</sub>,

constante del denominador en  $s^{-1}$ . Se utilizó la fórmula de  $E_{To}$  para cultivos "short". Vistamares está ubicada a 969 m.s.n.s. La escala de tiempo fue diaria.

Los resultados gráficos para la  $E_{To}$  se presentan en la figura 7.3. La hoja de cálculo Excel se adjunta con el desarrollo de la fórmula (Anexo). Hendrickx et al. (2005) estiman la evapotranspiración actual en la cuenca del Canal de Panamá, contribuye con el método de sensores remotos (SEBAL) mediante una imagen satelital LANDSAT a establecer los rangos de valores de la  $E_{Tr}$ . Los valores son menores a los de  $E_{To}$ . El  $K_c$  del área debe ser menor a uno (1.0) para que la  $E_{Tr}$  sea menor que la  $E_{To}$ . Otros autores realizan cálculos de la  $E_{To}$  con la fórmula de Penman Monteith.

Los valores de evapotranspiración para zonas tropicales son relativamente estables, tanto en la estación seca, como en la lluviosa. Niedzialek y Ogden (2010), por tanto los valores de  $E_{Treal}$  y  $E_{TP}$  suministrados por la Autoridad del Canal de Panamá (2006), se compararon por los estudiados por Niedzialek y Ogden (2010) y Georgakakos (2007) siendo similares. Los valores utilizados para realizar el balance hídrico fueron los de Georgakakos (2007) por encontrarse en forma geodistribuida. Los valores producto de la comparación se utilizaron de acuerdo a la escala aplicada en el modelo hidrológico Brown, Ayala y Ferrer modificado por Muñoz (2010) y Vega (2009).

#### 6.1.2 Downward or Top-down approach para la construcción de modelos (aproximación de interpolación)

Esta es una alternativa del enfoque desde lo macro (escala de cuenca) hasta lo micro (escala local) para encontrar una conceptualización con significancia. En otras palabras es una explicación y/o generalización cuya meta se alcanza al reducir la escala y señalar características inmersas entre ellas. El objetivo final es conocer el comportamiento de la cuenca, su respuesta al interpretar los datos observados entre escalas (Sivapalan, 2003). En esta tesis doctoral se utilizó de escala anual a escala mensual. Así, la ecuación 6.1 de balance hídrico se aplicó a la escala anual primeramente. De allí se extrajeron los patrones preliminares del cambio del almacenamiento en el tiempo. Posteriormente, se pasó de escala diaria a escala mensual, para definir si existían patrones que permanecen de forma estacional (estación lluviosa, estación seca) y para identificar los procesos probables asociados a los patrones mensuales. Una vez que se identificaron estos procesos (escorrentía, percolación,

etc.) se enumeraron parte de las variables que forman parte de ellos (humedad del suelo, capacidad de campo, etc). A continuación se modeló su comportamiento a escala diaria en la cuenca de investigación.

### 6.1.3 Análisis de la curva de recesión

La curva de recesión es una herramienta poderosa para investigar las características de la recarga en los ríos (trasvase de los volúmenes de almacenamiento). Esta curva contiene información valiosa concerniente a las propiedades de almacenamiento y a las características de los acuíferos. Brutsaert and Nieber (1977) propusieron graficar la relación de la pendiente de la curva del hidrograma  $-dQ/dt$  versus el caudal  $Q$  en escala doble logarítmica eliminando el tiempo como referencia.

$$-dQ/dt = f(Q)$$

donde  $f$  denota una función arbitraria. En el caso de esta investigación el periodo de tiempo se refería a la escala de tiempo diaria, por lo cual,  $Q$  de  $t1 = Q_{día1}$ ,  $Q$  de  $t2 = Q_{día2}$  ... ..luego entonces,  $(Q_{día1} - Q_{día2})/día$ ,  $(Q_{día2} - Q_{día3})/día$  ... ..  $(Q_{día(n-1)} - Q_{dían})/n$  día.

El análisis de la curva de recesión permitió establecer si el flujo en el cauce de los ríos eran analizados eran estables o si su variación era marcada. Se buscó establecer, si existían conexiones entre el flujo en un cauce y sus cuencas aledañas.

6.2 Desarrollar un modelo conceptual basado en la geomorfología y litología que represente el movimiento o cambios en los volúmenes de almacenamiento disponible entre estaciones en la subcuenca de El Río Chagres (OE2).

De acuerdo a los resultados del balance hídrico y a la geología del área se estableció un modelo conceptual para la cuenca alta del canal. Se asumió que los procesos hidrológicos estaban interconectados a través de la infiltración con los volúmenes de almacenamiento o caudal de aguas subsuperficiales. Lo anterior tuvo su base al considerar que la ubicación de las aguas subsuperficiales en las cuencas Noreste, como las del Río Boquerón y Río Chagres, descansan sobre formaciones de roca fracturadas, o llamadas K-COMA y la K-CHAO (ver acápite de la geología de Miranda, 2005).



Según este informe, la Formación K-CHAO, está conformada en su mayoría por rocas fuertemente fracturadas, falladas, cizalladas y deformadas, mostrando ondulaciones, las cuales evidencian esfuerzos compresivos que perturbaron dichos estratos; lo que puede originar el movimiento de la escorrentía y/o flujos sub-superficiales hacia la cuenca del Río Boquerón, pasando por el río Pequení (flujos subsuperficiales).

Según Alley (2002), las velocidades de flujo a través de las rocas, en sistemas de rocas fracturadas, son mucho mayores que las dadas en medios no consolidados, como las gravas y arenas; esto debido a las bajas porosidades efectivas de los sistemas de rocas. Adicionalmente, es posible esperar que las recargas y descargas de flujos sub-superficiales, en un sistema como éste, sea afectado por variaciones estacionales generando respuestas rápidas.

Así, con la cartografía de base, tanto topográfica como geológica, fotografías e imágenes aéreas, pluviometría, fluviometría, clima, informes geológicos, informes de hidrología superficial y subterránea, se estableció un modelo perceptual, para posteriormente conceptualizarlo como la representación del sistema hidrogeológico de la cuenca alta del canal, específicamente de la subcuenca de El Río Chagres.

Este modelo perceptual está basado en las posibles conexiones generadas por los flujos de agua, a través de la cuenca alta del canal, marcando con esto, los pasos o caminos preferenciales del agua de una manera perceptual en los mapas suministrados. Luego se sugirieron cambios en la arquitectura del modelo. Se estimó al menos, la sugerencia de un cambio de valía en la definición previa del modelo Brown Ayala y Ferrer (1973), adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz (2010).

6.3 Mejorar el modelo Brown y Ferrer (1973), modificado por Muñoz (2010), para identificar variables dominantes en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Chagres y agregar su parametrización en el modelo hidrológico. (OE 3)

Se aplicó el modelo Brown y Ferrer (1973), modificado por Muñoz (2010), para calcular el balance hídrico en forma agregada de la subcuenca del Río Chagres. Como resultado final,

luego de calibración, se simuló la respuesta de la cuenca o caudales y se identificaron los parámetros mayormente asociados a la liberación de aguas subsuperficiales y subterráneas dentro del sistema. Es decir, las que representan el movimiento bajo la superficie del suelo y que son modeladas dentro del box de un modelo hidrológico, como el aporte del subsuelo al cauce del río. El desarrollo de la secuencia está desglosada en este punto 6.3 y en sus subtítulos.

### 6.3.1 Aplicación del Modelo Brown, Ayala y Ferrer, adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz 2010

El modelo pluvial propuesto por Ferrer et al. (1973), consiste en un modelo hidrológico de paso mensual que considera la cuenca como un sistema de doble almacenamiento, uno subsuperficial y uno subterráneo, donde la única entrada de agua es la precipitación y las salidas son el flujo subterráneo, el flujo producido por la escorrentía directa y la evapotranspiración. Para esta última el modelo requiere como entrada el valor de la evapotranspiración máxima de la cuenca o potencial. El modelo conceptual se presenta en la Figura 6.1

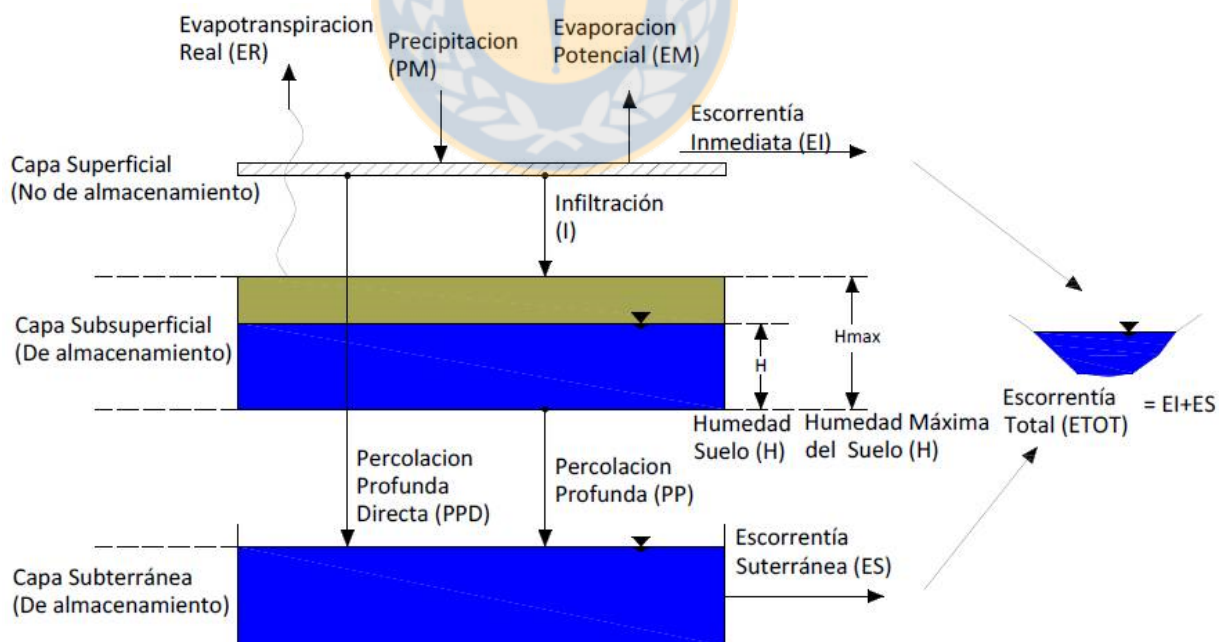


Figura 6.2. Modelo Conceptual definido por Modelo Brown, Ayala y Ferrer, adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz (2010). Tomado de Muñoz (2010).

La descripción del modelo, como lo relativo a su secuencia matemática es descrito a continuación de forma textual de la tesis de Vergara (2011) y Muñoz (2010).

La Figura 6.3 muestra los procesos o caminos que toma el agua hasta su salida. Primero, es necesario conocer la precipitación (PM) y la evaporación potencial (EM) en valores medios mensuales. Luego del agua caída, una parte se transforma en escorrentía inmediata (EI), una parte recarga directamente el acuífero (PPD) y una parte recarga la capa subsuperficial a través de la infiltración (I). El agua infiltrada se almacena en el embalse o capa subsuperficial, en forma de humedad (H). Luego, desde la capa subsuperficial y en función de H y EM, se calcula la evaporación real (ER). Luego, de la humedad restante, una queda en la capa subsuperficial como humedad y otra recarga el acuífero a través de la percolación profunda (PP). Finalmente una porción del almacenamiento subterráneo se transforma en escorrentía subterránea (ES), la cual junto a la escorrentía inmediata componen la escorrentía total de la cuenca (ETOT).

El proceso matemático se describe según la siguiente secuencia.

Las variables de entrada PM y EM se multiplican por dos parámetros A y B respectivamente. Estos parámetros permiten modificar las variables de entrada, y su uso se justifica en casos donde se sabe que la PM y EM no están disponibles para la estación o no son representativos de la cuenca, de lo contrario su valor debería ser la unidad.

$$P_{pluvial}(t) = A \cdot PM(t) \quad (6.2)$$

$$ETP(t) = B \cdot EM(t) \quad (6.3)$$

Donde  $P_{pluvial}$  y ETP son la precipitación pluvial y evapotranspiración potencial dependientes del mes (t) respectivamente.

Conocida la precipitación, el modelo calcula la EI, la cual se determina multiplicando  $P_{pluvial}$  por un coeficiente de escorrentía  $C(t)$ , el cual es una proporción del coeficiente de escorrentía máximo ( $C_{max}$ , parámetro del modelo) que se tiene cuando la capa subsuperficial se encuentra saturada. Dicha proporción se determina como la razón entre la humedad media del suelo entre el mes  $t$  y el mes  $t - 1$ , y la máxima capacidad de retención de agua del suelo ( $H_{max}$ ).

$$EI(t) = C(t) \cdot P_{pluvial}(t) \quad (6.4)$$

$$C(t) = C_{max} \cdot \frac{H_{max}(t) + H(t-1)}{2 \cdot H_{max}} \quad (6.5)$$

Al inicio de los cálculos no se conoce la humedad del suelo en el mes  $t = 1$ , por lo tanto asume un valor auxiliar o de arranque  $H_{aux}(t)$  equivalente a  $H_{max}$ . Luego el valor real de  $H(t)$ , se calcula tras un proceso iterativo luego de determinar la ER.

El agua sobrante puede recargar el embalse subsuperficial y el embalse subterráneo por medio de la I y PPD. Lo primero que se satisface en el modelo es la PPD, la cual se calcula como un porcentaje (D, parámetro del modelo), de la precipitación sobre una precipitación límite ( $P_{lim}$ , parámetro del modelo) sobre la cual existe aporte directo al embalse subterráneo.

$$PPD(t) = D \cdot (P_{pluvial}(t) - P_{lim}) \quad (6.6)$$

Satisfecha la EI y la PPD, se calcula la infiltración como el agua sobrante.

$$I(t) = P_{pluvial}(t) - EI(t) - PPD(t) \quad (6.7)$$

Luego se determina el agua disponible para evaporar, que es el equivalente a la humedad en el suelo al inicio del mes ( $I(t)$ ). Esta humedad se calcula como la humedad al final del mes anterior ( $H(t - 1)$ ) más el agua infiltrada ( $I(t)$ ).

$$H^1(t) = H(t - 1) + I(t) \quad (6.8)$$

Lo primero a satisfacer con esta humedad es la evaporación real. Para esto se define un nivel crítico de humedad ( $H_{crit}$ ), el cual se determina como un porcentaje de  $H_{max}$  (PORC, parámetro del modelo).

$$H_{crit} = PORC \cdot \frac{H_{max}}{100} \quad (6.9)$$

Con  $H_{crit}$  conocido, se calcula la ER según la siguiente función (ec.6.10). Esta función condiciona la ER según el nivel de humedad disponible respecto del nivel crítico, y asume que

cuando la humedad está por sobre dicho nivel, no existe dificultad de evaporación, de lo contrario la evapotranspiración real será proporcional a la ETP y al nivel de humedad respecto de  $H_{crit}$ .

$$ER(t) = \begin{cases} ETP(t) & \Leftrightarrow H^1(t) > H_{crit} \text{ y } H_{crit}(t) \geq ETP(t) \\ H^1(t) & \Leftrightarrow H^1(t) > H_{crit} \text{ y } H_{crit}(t) < ETP(t) \\ ETP(t) \cdot \frac{H^1(t)}{H_{crit}} & \Leftrightarrow H^1(t) \leq H_{crit} \text{ y } H_{crit}(t) \geq ETP(t) \\ H^1(t) & \Leftrightarrow H^1(t) \leq H_{crit} \text{ y } H_{crit}(t) < ETP(t) \end{cases} \quad (6.10)$$

Luego, la humedad en el mes  $t(H(t))$  es la humedad al inicio menos la ER.

$$H(t) = H^1(t) - ER(t) \quad (6.11)$$

En el paso anterior se calcula el valor de  $H(t)$  (variable que se asume igual a  $H_{max}$  al inicio de los cálculos), por lo tanto se repiten todos los pasos de cálculo anteriores, pero con el valor de  $H(t)$  calculado. Este proceso se repite de manera iterativa, hasta que la diferencia entre el valor de  $H(t)$  calculado y  $H_{aux}(t)$  sea menor que una tolerancia permitida (tol).

$$|H(t) - H_{aux}(t)| \leq tol \begin{cases} Si & \Rightarrow ok \\ No & \Rightarrow H_{aux}(t) = H(t) \end{cases} \quad (6.12)$$

Con la humedad de la capa subsuperficial conocida, se puede determinar la percolación profunda, la cual se define como el exceso de agua disponible por sobre  $H_{max}$ .

$$PP(t) = \begin{cases} 0 & \Leftrightarrow H(t) < H_{max} \\ H(t) - H_{aux} & \Leftrightarrow H(t) \geq H_{max} \end{cases} \quad (6.13)$$

Luego, la percolación profunda total (PPT) será la suma de la PPD y PP.

$$PPT(t) = PPD(t) + PP(t) \quad (6.14)$$

La PPT constituye el único aporte de agua al embalse subterráneo. Luego, la ES se define como una proporción del volumen embalsado (V). Esta proporción se define a través de un coeficiente de escorrentía subterránea ( $C_k[t^{-1}]$ ), que es un parámetro del modelo.

$$ES(t) = C_k \cdot V(t) \quad (6.15)$$

El volumen del embalse subterráneo depende de la recarga y de la escorrentía producida, por lo tanto, una manera de calcularlo es a partir de la forma discreta de la ecuación de balance de masa.

$$\frac{PPT(t)+PPT(t-1)}{2} - \frac{ES(t)+ES(t-1)}{2} = \frac{V(t)-V(t-1)}{\Delta t} \quad (6.16)$$

Luego, al evaluar la ec.3.15 en  $t$  y en  $t-1$  y reemplazarla en la ec.3.16, se tiene lo siguiente.

$$ES(t) = \left[ \frac{2-C_k}{2+C_k} \right] \cdot ES(t-1) + \left[ \frac{C_k}{2+C_k} \right] \cdot (PPT(t-1) + PPT(t)) \quad (6.17)$$

La ec.3.17 permite calcular la ES, en función de variables y parámetros conocidos. Además, la ecuación muestra que para valores bajos de  $C_k$ , la ES del mes  $t$  será muy similar a la del mes anterior, por lo que la ES presentará una variabilidad muy baja y su valor medio estará condicionado al valor de partida de la ES, el cual es definido al inicio de la simulación. Por otra parte, un valor de  $C_k$  entre 0.4 y 1.0, entrega la máxima variabilidad a la ES.

Finalmente el caudal de salida de la cuenca originado por la precipitación pluvial ( $Q_{producido}$ ) se determina multiplicando la escorrentía total (ETOT) por el área de la cuenca (AR).

$$ETOT(t) = EI(t) + ES(t) \quad (6.18)$$

$$Q_{producido}(t) = AR \cdot ETOT(s) \quad (6.19)$$

Si bien, el modelo presentado es física y conceptualmente consistente, este presenta una inestabilidad matemática bajo determinadas condiciones de  $H_{max}$  y  $C_{max}$ , ya que para un coeficiente de escorrentía alto (mayor a 0.5) y una humedad máxima del suelo baja (menor a 100 [mm]), el modelo tiende a divergir, debido a que ambos parámetros se encuentran interrelacionados y son condicionantes de la relación de convergencia  $|H(t) - H_{aux}(t)| \leq tolerancia$ . Esto ocurre, porque un valor bajo de  $H_{max}$  entrega una alta variabilidad del coeficiente de escorrentía y por lo tanto alta variabilidad del agua infiltrada, luego puede ocurrir que la suma del agua infiltrada más la humedad del mes anterior menos la evaporación real

sea mayor que  $H_{max} (I(t) + H(t - 1) - ER(t) > H_{max})$ , en dicho caso el coeficiente de escorrentía calculado por el modelo será mayor que uno y luego la humedad del suelo tomaría un valor negativo, lo que produce la divergencia del modelo.

#### 6.3.1.1 Optimización de los parámetros del modelo

El modelo descrito por Vega (2009) y Muñoz (2010), utiliza la herramienta denominada Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT), la cual es un conjunto de herramientas de análisis y funciones con interfaz gráfica de usuario integrado en Matlab®.

Esta herramienta evalúa los valores asignados a los parámetros que equilibran las ecuaciones dentro del modelo ejecutando repetitivas simulaciones con set de parámetros seleccionados aleatoriamente dentro de un rango definido por el usuario, para una estructura fija del modelo.

El programa almacena las salidas y los valores de la(s) función(es) objetivo definida(s) para la posterior evaluación del comportamiento del modelo. De manera análoga se puede evaluar la incerteza de la estructura o arquitectura de un modelo manteniendo fijas las variables de entrada y parámetros y modificando la estructura del modelo.

El rango de los parámetros debe ser lo suficientemente amplio para que cualquier combinación posible sea simulada. MCAT ejecuta el modelo y almacena las salidas y valores para su posterior análisis.

El número de simulaciones determina que tan amplio es espacio de parámetro que puede ser explorado y la cantidad de series que pueden ser reproducidas, para lo cual se debe considerar un tamaño alto como computacionalmente sea posible (10.000 o más simulaciones).

#### 6.3.2 Identificación de variables dominantes e inclusión de su parametrización en arquitectura del modelo cuenca del río Chagres.

Una de las características que permitieron identificar las variables dominantes asociadas a los procesos hidrológicos de la cuenca del río Chagres, fue la diferencia del régimen de precipitación para el cual fue diseñado el modelo original en 1973. Este régimen fue diseñado

para cuencas chilenas de clima mediterráneo. En cambio el río Chagres el régimen de precipitación es de clima tropical. En base a ello, fue posible determinar si la curva de recesión generada por la arquitectura del modelo representaba el comportamiento de la cuenca del río Chagres. Este resultado permitió decidir si se modificaba el modelo en base a estas variables, generando una arquitectura del modelo cónsona con la cuenca bajo estudio.

### 6.3.2.1 Arquitecturas propuestas como modificación conceptual al modelo Brown, Ayala y Ferrer (1973)

Considerando las diferencias entre el régimen de precipitaciones y la estacionalidad entre las cuencas de Chile y Panamá, se detectaron limitaciones en el modelo. De allí, que se realizaron modificaciones al modelo: para representar el tipo de régimen pluvial y por ende la forma de almacenar la humedad en el suelo. Se optó por cambiar el paso de tiempo mensual del modelo original a paso de tiempo diario, porque la dinámica del flujo del agua no era reflejada en la señal de respuesta del modelo, lo que requirió el cambio en el sistema de almacenamiento subsuperficial lineal por uno no lineal.

#### a. Cambio en la contabilización de la humedad del suelo no lineal.

Para representar el cambio que sufre de forma diaria la humedad en un suelo con capacidad de retención de agua en cuencas tropicales como el río Chagres, en comparación a las cuencas chilenas, por ejemplo el río Chillán, se utilizó la ecuación no lineal 6.20. Esta ecuación involucra que las relaciones utilizadas en modelo Hidrológico Chileno, Brown Ayala y Ferrer (1973), codificado de lenguaje de programación FORTRAN® A MATLAB® por Rivano, con adaptaciones de Correa y Rivera (2006), adaptado con la herramienta mcat de Matlab® por Vega (2009), y modificado por Muñoz (2010) cambien.

Así, la escorrentía superficial (EI) es relacionada con la humedad máxima del suelo (Hmax) y con la Humedad, tanto la humedad en el tiempo inicial (H(t-1)), como la humedad del paso de tiempo analizado (H(t)) en formal no lineal. Esto a través del exponente HOUBt. Esta relación no lineal es multiplicada por la precipitación observada de la cuenca. Lo que genera una respuesta no lineal en el suelo.

La escorrentía superficial cambia de  $EI(t) = C(t) \cdot P_{Pluvial}(t)$  cambia a:



$$\frac{EI}{PM} = \frac{H(t-1)^{HOUBt}}{Hmax} \quad (6.20)$$

despejando, la escorrentía superficial queda igual a:

$$EI = PM * \frac{H(t-1)^{HOUBt}}{Hmax} \quad (6.21)$$

La representación gráfica que relaciona el coeficiente de escorrentía directa con la humedad del suelo y la capacidad de campo se explica en la figura 6.5 y se complementa con la conceptualización de la cuenca drenada (Figura 3.1) en lo expresado en la Figura (6.4 y 6.6)

En relación a la humedad crítica se mantuvo la relación:

$$H_{crit} = PORC \cdot \frac{H_{max}}{100} \quad (6.22)$$

y se modificó el cálculo de la ER a:

$$ER(t) = \begin{cases} ETP(t) * Umbral & \text{si } H^1(t) < H_{crit} \text{ si no } Umbral = 1.0 \\ 0 & \text{si } ER(t) < 0 \\ H1(t) - 0.0001 & \text{si } H^1(t) > ER(t) ; H1(t) = H1(t-1) - ER(t) \end{cases} \quad (6.23)$$

Siendo el umbral el límite en el almacenamiento cercano al flujo sobre el suelo (se mide de abajo para arriba).

Quedando la humedad en el día igual a:

$$H(t) = H^1(t) - ER(t) \quad (6.24)$$

En esta modificación a la arquitectura del modelo, la percolación es descontada de la nueva subrutina de almacenamiento, omitiendo la percolación profunda y directa, por un solo caudal de percolación (ver subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) y de la percolación, debido el aumento de niveles de humedad en el suelo)

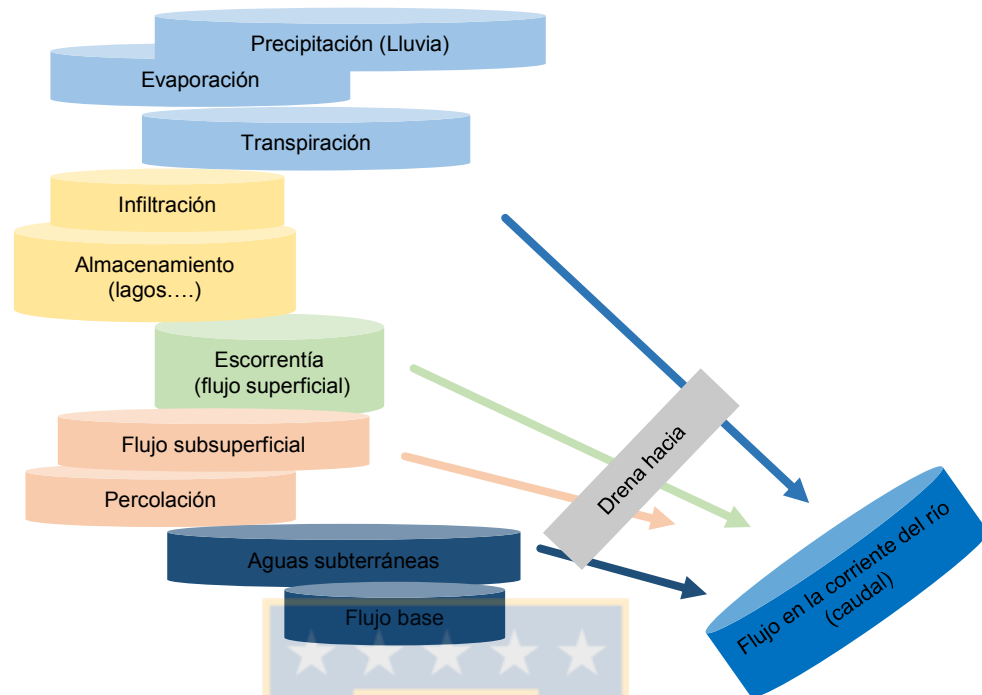


Figura 6.3 Componentes del ciclo hidrológico de una cuenca drenada. Elaboración basada en los procesos a representar para la cuenca del Río Chagres, República de Panamá, que siendo un área con periodos lluviosos de más de 200 días al año, requiere insertar un almacenamiento adicional para representar el flujo rápido de agua en el sistema.

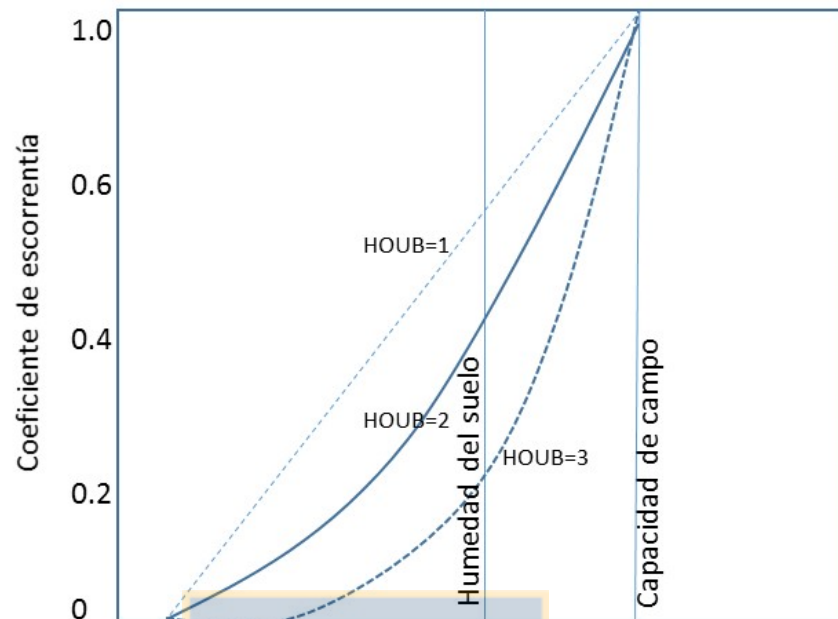


Figura 6.4 Relación entre la humedad del suelo, capacidad del campo, coeficiente de escorrentía y valor del exponente de la ecuación no lineal (HOU) (AghaKouchak and E. Habib, 2010) basada en Bergström y Graham (1997). El coeficiente de escorrentía es la relación  $dQ/dP = H(t)/H_{max}^{HOUBt}$ . Cuando se acerca a uno, se ha generado la escorrentía en la totalidad de la cuenca, acercándose a la capacidad de campo ( $H_{max}$ ) y cuando se acerca a cero, la cuenca aún no drena la humedad  $H(t)$  es baja. El exponente  $HOUBt$  representa la no linealidad de la ecuación. Cuando el valor de 1 es superado su incremento se da exponencialmente.

## b. Aumento de particiones del caudal antes de llegar al cauce del río

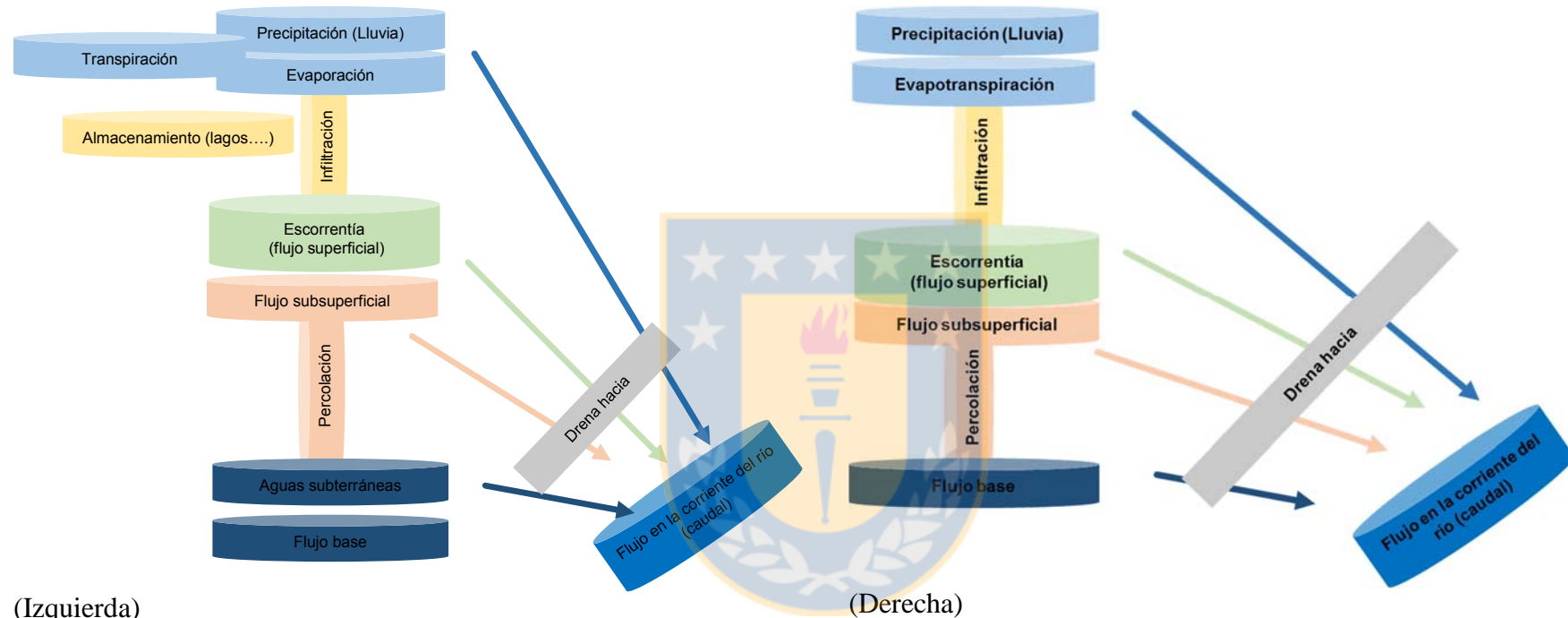


Figura 6.5. Esquema conceptual de los procesos de la cuenca del Río Chagres. A la izquierda de la figura se observan los componentes generados por una cuenca drenada. Dado que el almacenamiento en lagos, lagunas, etc., no está dentro de la cuenca drenada del Río Chagres se omite del modelo conceptual. Como en la actualidad se carecen de mediciones de pozos de observación, se consolidó el flujo base con las aguas subterráneas, puesto que ambos drenan hacia el flujo en la corriente del río. Adicionalmente, el conjunto de actividades transpiración evaporación, se consolidaron en uno solo, llamado evaporación. Así quedan 6 procesos en la cuenca generados por la precipitación. Estos son: evaporación, infiltración, escorrentía, flujo subsuperficial, percolación y flujo base. La percolación profunda y directa del modelo Brown, Ayala y Ferrer (1973) se consolida en un solo proceso de percolación.

- c. Subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) y de la percolación, debido el aumento de niveles de humedad en el suelo.

La consolidación de la percolación definida por el modelo utilizado en Vega (2009) y Muñoz (2010), se expresó la ecuación 6.23 y previa a la entrega de la percolación del flujo. Se mejoró el almacenamiento llamado flujo subsuperficial, es decir, el modelo cuenta ahora con tres cajas de almacenamiento, una más que en el modelo previo (Figura 6.7). Las ecuaciones 6.21, 6.22 y 6.24 expresan la entrega de estos almacenamientos. La ecuación final de caudal quedó expresada en la ecuación 6.25. Se ha utilizado como referencia matemática el modelo HBV (Bergström S. 1976, Gafurov et. al 2006).

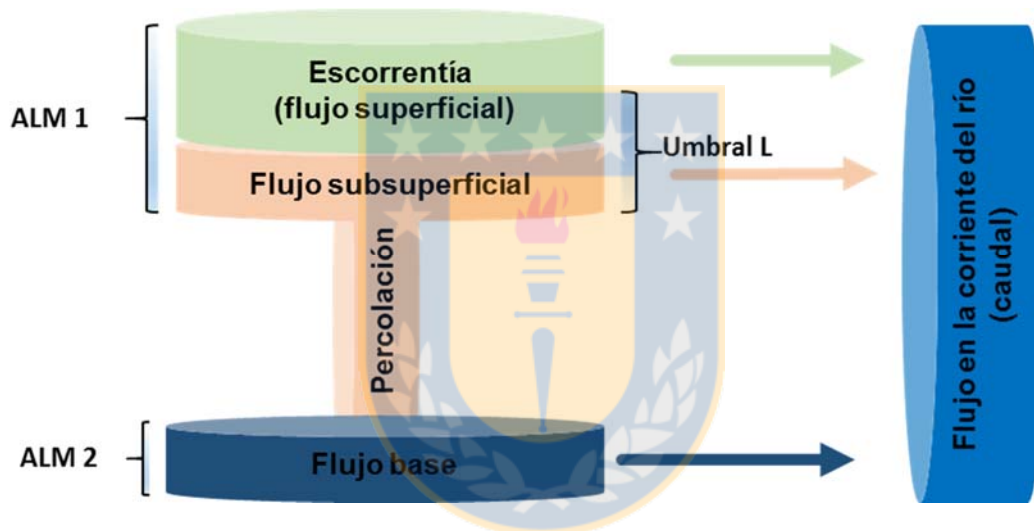


Figura 6.6. Subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) y de la percolación.

$$Q_{esc} = \frac{1}{k_0} * (ALM1 - Umbral L) * \frac{Area}{86400} \quad (6.25)$$

$$Q_{flujo\ subsup} = \frac{1}{k_1} * ALM1 * \frac{Area}{86400} \quad (6.26)$$

$$Q_{perc} = \frac{1}{k_{perc}} * ALM1 * \frac{Area}{86400} \quad (6.27)$$

$$Q_{flujo\ base} = \frac{1}{k_2} * ALM2 * \frac{Area}{86400} \quad (6.28)$$

$k_0, k_1, k_{perc}$  y  $k_2$ , son los parámetros de entrega de cada uno de los almacenamientos. Estos representan la entrega del caudal en días, puesto que el modelo ha cambiado de meses a días en su nueva arquitectura. El caudal que en las iteraciones del modelo ha sido introducido en milímetros para facilitar los cálculos, se multiplica por el área en  $\text{km}^2$  y se divide entre los segundos de un día, para obtener el caudal de cada almacenamiento en  $\text{m}^3/\text{seg}$ . De esta manera se podrá comparar con el caudal de observación que ha sido suministrado por la ACP en  $\text{m}^3/\text{seg}$  por día.

Dado que el caudal de escorrentía es descargado únicamente dentro del módulo de almacenamiento del caudal de flujo base, la ecuación final para el flujo en la corriente del río (caudal final) queda:

$$ETOT(t) = Q_{esc}(t) + Q_{flujo\ subsup}(t) + Q_{flujo\ base}(t) \quad (6.29)$$

#### 6.3.2.2 Optimización de los parámetros del modelo modificado

La optimización de los parámetros del modelo se realizó con dos variantes. La original, utilizando la herramienta MCAT (Vega 2009, Muñoz 2010) y una adicional que utiliza la herramienta *optimization toolbox* (Melone et al. 2008). Ambas herramientas se apoyan en el método de *simulated annealing* para calibrar el modelo.

*Simulated annealing* (Aarts and Korst 1989) es una técnica que utiliza la optimización de Monte Carlo (Metropolis et. al., 1953) propuesta por Kirkpatrick et al. (1983) que consiste en un algoritmo de optimización global, cuyo objetivo general es encontrar una buena aproximación al valor óptimo de una función en un espacio de búsqueda grande. A este valor óptimo se lo denomina "óptimo global".

El nombre e inspiración viene del proceso de recocido del acero y cerámicas, una técnica que consiste en calentar y luego enfriar lentamente el material para variar sus propiedades físicas. El calor causa que los átomos aumenten su energía y que puedan así desplazarse de sus posiciones iniciales (un mínimo local de energía); el enfriamiento lento les da mayores probabilidades de recristalizar en configuraciones con menor energía que la inicial (mínimo global).

La explicación teórica de optimización con *simulated annealing* es que esta herramienta empieza con una simulación de Monte Carlo a temperaturas altas. Lo que significa que un porcentaje alto de pasos aleatorios que tiendan al aumento de la energía serán aceptados. Después de un número razonable de pasos de Monte Carlo, la temperatura decrece. Este descenso y aumento de la temperatura termina hasta que la temperatura óptima se alcance. En modelos hidrológicos se refiere a que el óptimo de la función objetivo sea alcanzado.

Aunque *el MCAT* utiliza en el método de *simulated annealing*, su calibración es semi automática. El usuario debe hacer una corrida del modelo para posteriormente de forma manual, cambiar los valores de los parámetros que en la corrida anterior, se indican por la herramienta *MCAT*, como fuera del rango correcto para la calibración. Lo que se traduce en un proceso tedioso y que consume mucho tiempo (semanas) hombre-máquina en el proceso de obtener el resultado de un conjunto (set) de parámetros. Incluso, la subjetividad forma parte de la toma de decisiones al buscar la respuesta de un único set de parámetros, puesto que la decisión de ampliar o no el rango de los valores por parámetro queda en manos del usuario de la herramienta *mcAT*. Si el set se refiere a encontrar valores mensuales, es decir, para un periodo de 5 años, se estaría trabajando con 60 valores para 8 parámetros. Sin embargo, la subjetividad aumenta cuando se presentan valores diarios. Aplicando el mismo ejemplo de 5 años, de ser 60 valores, se pasa a 4380 días a calibrar, y cuando la función objetivo no es alcanzada, decidir el rango de nuevos parámetros de forma visual o manual, aumenta el nivel de subjetividad llevando el proceso a obtener resultados no coherentes con los datos observados o bien considerados como coherentes pero sin soporte razonable en su interpretación. Esto se traduce en una dificultad de evaluar de forma explícita la confianza en las simulaciones del modelo.

Lo anterior fue mejorado con el uso de la herramienta de optimización *Optimization toolbox* para Matlab® (Melone et al. 2008), la cual calibra el modelo de forma automática, aumentando la confianza en las simulaciones del modelo y por ende reduciendo el tiempo de calibración a segundos, dependiendo del sistema operativo de la computadora en uso.

#### 6.4 Proponer variables a monitorear en la subcuenca del Río Chagres que coadyuven a la gestión hídrica de la cuenca del canal (OE4).

La importancia de la definición de las variables radica en que la gestión hídrica está basada en el concepto de desarrollo sustentable, el cual se refiere a la posibilidad de mantener un

equilibrio entre al menos tres objetivos a corto plazo, social, ambiental y económico. Estos factores que explican un cierto nivel de desarrollo del ser humano en vinculación al lugar que habitan y la interacción entre territorios, nivel que es siempre transitorio y está en constante evolución o cambio .

Uno de los procesos para alcanzar metas de desarrollo sustentable se vincula a la sustentabilidad ambiental y a la gestión hídrica y, por lo tanto está asociado a la gestión de territorios, sus elementos naturales y sus recursos y a la dinámica de intercambio entre varios territorios. Cuanta más alta es la demanda de recursos que se hace sobre determinado territorio más complejo es mantener la llamada sustentabilidad ambiental. De allí que el llamado desarrollo sustentable es por lo tanto la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que deben llevar a cabo generaciones de seres humanos con relación a sus intereses (Dourojeanni, 2008). Si el desarrollo sustentable se mantiene en el tiempo se alcanza la sostenibilidad.

Para la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership – GWP) alcanzar dicha sustentabilidad ambiental es alcanzar la gestión (hídrica) integrada del agua como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (Pochat, 2008). Por lo tanto si la gestión integrada del agua es definida como un proceso y si la sustentabilidad ambiental vincula la gestión, entonces es importante identificar y entender procesos y ecosistemas vitales que formen parte de la gestión del agua. Para ello es imprescindible acotar una unidad única de evaluación entre los territorios donde ocurren los citados procesos vitales. Para esta investigación, la cuenca es la unidad única de investigación, a la que pertenecen los procesos bajo este estudio, por ello con los resultados del objetivo específico dos, es posible presentar recomendaciones iniciales de las variables que deben ser monitoreadas, para obtener mayores datos que permitan coadyuvar en el manejo sostenible de la cuenca del río Chagres, en el Canal de Panamá.



## 7. Resultados y Discusiones

### 6.1 Estimación del balance hídrico (OE1)

La Figura 7.1 muestra la variación espacial de la precipitación (lluvia) sobre el área del canal de Panamá entre 1965 y 1997. Dentro del área de la cuenca la precipitación varió en promedio espacialmente entre 2000 mm anuales a 5000 mm anuales. Específicamente sobre la cuenca alta del canal, la variación espacial que se produjo está entre 2500 a 5500 milímetros. Una posible causa es la baja evapotranspiración en áreas con bosques.

Entre el año 1965 y 1997, ocurrieron 6 anomalías frías con débil intensidad (1964-65, 1971-72, 1974-75, 1983-84, 1984-85, 1995-96) y 2 anomalías severas (1973-74, 1975-76). En relación a las anomalías cálidas, ocurrieron 3 débiles (1969-70, 1976-77, 1977-78), 5 moderadas (1963-64, 1968-69, 1986-87, 1991-92, 1994-95) y 5 severas (1965-66, 1972-73, 1982-83, 1987-88, 1997-98). El resto de los años se consideraron normales (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>). El contraste de los resultados en imágenes sobre el área de estudio (Figura 7.2), corroboró el comportamiento de las anomalías señaladas en la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Las imágenes enfatizan la implicación del ENSO dentro del ciclo hidrológico en la cuenca alta del canal.

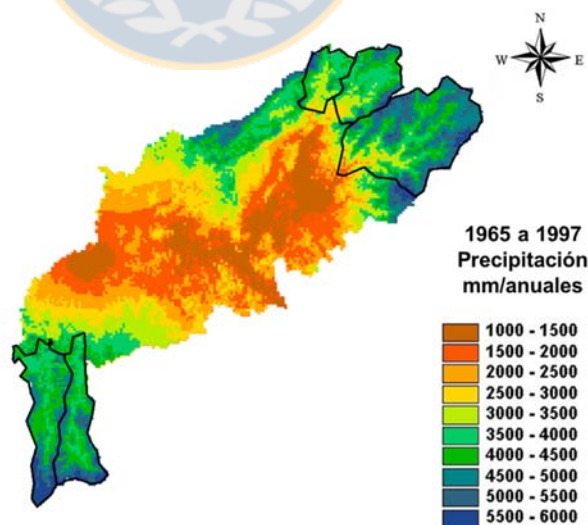


Figura 7.1. Lluvia geodistribuida promedio sobre la cuenca del canal de Panamá. Año 1965 a 1997.

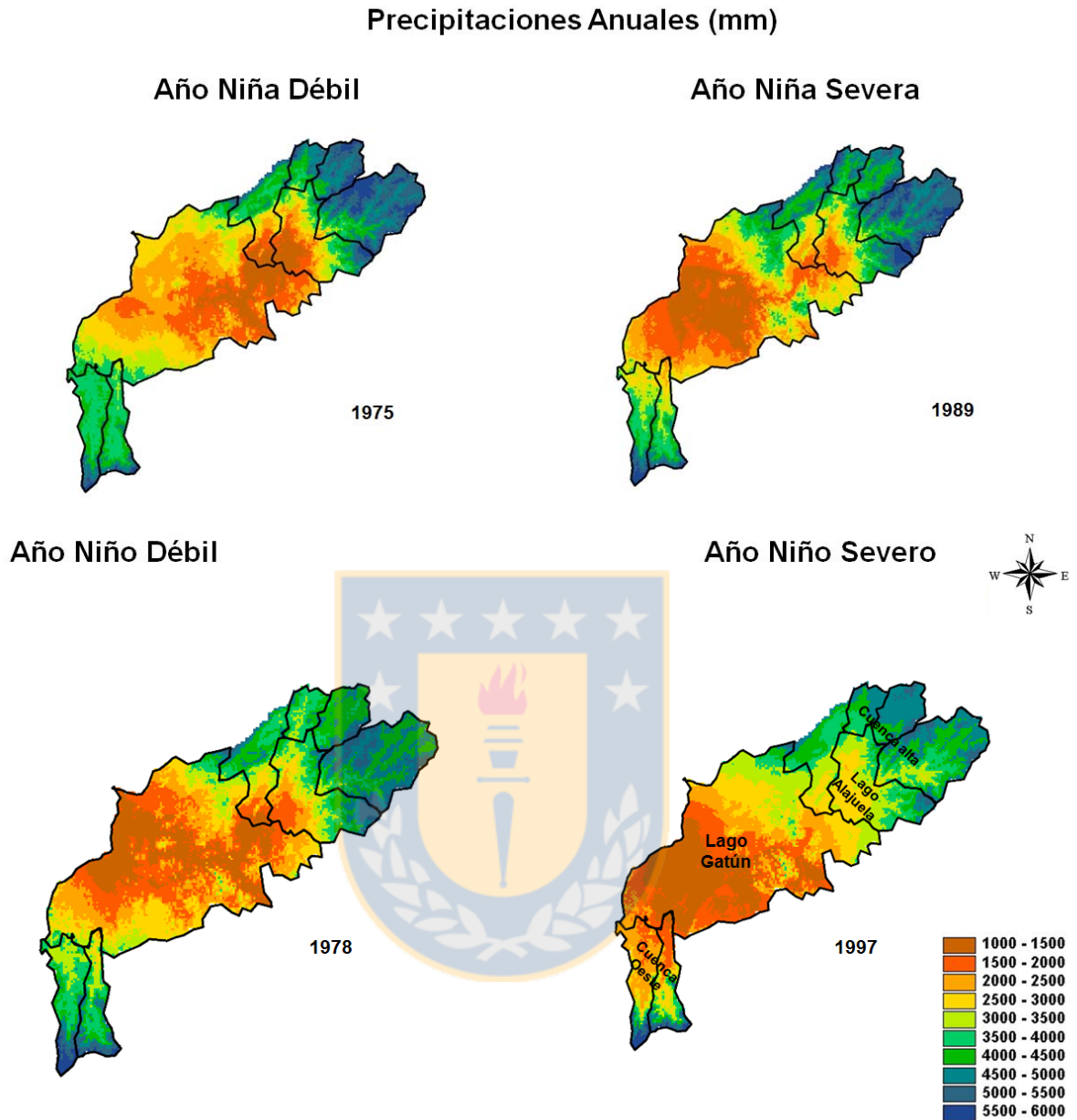


Figura 7.2. Comparación de anomalías cálidas y frías sobre la cuenca del canal de Panamá. Ver la variación espacial sobre el lago Gatún y Lago Alajuela. Ambas fuentes de agua la operación del canal y en el abastecimiento de la población de ciudad de Panamá.

### Estimación de la evapotranspiración

Utilizando los datos suministrados por la Autoridad del Canal de Panamá, se estimó la evapotranspiración multiplicando por 0.7<sup>8</sup> la evaporación de bandeja de la estación Vistamares, en la cuenca del río Chagres. La Figura 7.3 muestra la distribución en el tiempo de la ETP de algunos años. Esta distribución corrobora los valores de evapotranspiración diarios en la cuenca alta del canal calculados por Wang & Georgakakos (2007) Niedzialek y Ogden (2010). En ambos estudios los valores diarios de evapotranspiración fluctúan entre 2 y 4 milímetros, i.e, un valor anual de 870 milímetros para la cuenca del río Boquerón, 706 milímetros para la cuenca del río Pequení y 760 milímetros para la cuenca del río Chagres. Los valores mensuales fluctúan como en la tabla 7.1.

Años de aplicación	enero	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
1980 a 2003	96	88	105	86	60	62	48	54	68	60	54	89

Tabla 7.1 Variación de evapotranspiración en milímetros por mes. Cuenca alta del canal. Wang & Georgakakos (2007)

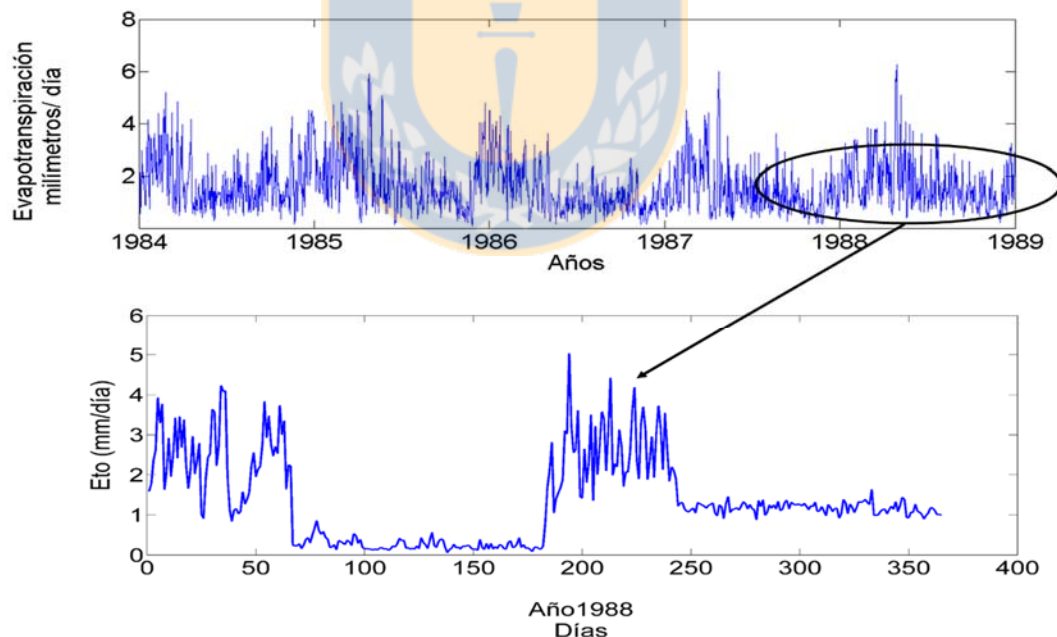


Figura 7.3. Valores diarios de evapotranspiración de la cuenca alta del canal de Panamá. Arriba: Datos suministrados por la ACP calculados con la fórmula de Penman Monteith. Abajo: Cálculo para esta investigación de la evapotranspiración utilizando la fórmula de la FAO(56)

<sup>8</sup> valor de conversión establecido por la ACP

### Downward approach (aproximación de interpolación)

Al aplicar la metodología del downward approach en el balance hídrico, los resultados obtenidos mostraron similitud entre las cuencas del río Chagres y el río Pequení, durante las anomalías cálidas del periodo de estudio. Solamente el comportamiento del patrón anual fue similar en el río Boquerón para el ENSO de 1997 (Figura 7.4). Dada la posibilidad de un patrón estable en la cuenca alta del canal, se realizó el balance hídrico (interpoló - downscaling) de forma mensual. Se obtuvo que durante los años estudiados dentro del periodo, de ENSO con anomalía cálida, el patrón en la señal de cambio era el mismo para todas las cuencas bajo estudio (Figura 7.5). El patrón se marcó en los meses de estiaje (diciembre a abril). Para confirmar este patrón, se realizó el análisis de la curva de recesión (Sayama 2011) en los tres ríos de la cuenca alta, lo que determinó que el flujo subsuperficial es más estable en la cuenca del río Chagres. En las cuencas de los ríos Pequení y Boquerón, el flujo es menos estable. La inestabilidad indica que el existe movimiento subsuperficial en la cuenca cuenca y entre la cuenca (Figura 7.6).

En el caso de la cuenca alta del canal, es razonable que ocurran ambos tipos de movimientos dado que la geología descrita indica que el río Pequení y el río Chagres descansan sobre el mismo tipo de roca fracturada. Por ende, su patrón es similar incluso en escala anual, no así para el río Boquerón, cuyo patrón es similar solamente a escala mensual. Esto es razonable que se deba a que el río Boquerón se encuentra en el límite del Bloque 1 de la falla del río Gatún. Además de que las rocas expuestas en parte de su canal no son en toda su longitud basaltos como en el río Pequení y el río Chagres (Figura 7.6). Más aún, Miranda (2005), reporta que existe una zona donde las rocas de basalto subyacen bajo las calizas. Esto indica que existe una barrera subyacente entre la cuenca del río Boquerón y las otras. Bajo condiciones de ENSO con anomalía cálida, las tres cuencas alcanzan el umbral donde se comunican en la escasez de flujo al generar flujos preferenciales en estiaje, comportándose como una sola cuenca, donde comparten almacenamiento profundo (Figura 7.4a) . Esto se observa en el gráfico escorrentía/precipitación (Figura 7.8). Este resultado es análogo a lo descrito en Muñoz-Villers y McDonnell (2012), quienes señalan que en cuencas húmedas tropicales, la respuesta precipitación escorrentía aparentemente es dominada por la recarga subsuperficial que ocurre a través de la cuenca, sobre todo en su parte con mayor pendiente, tanto como la percolación profunda de la precipitación debida a los suelos (en nuestro caso, rocas fracturadas, ver Figuras 5.5 a 5.10). El análisis de los datos se realizó para el período de tiempo de los últimos dos Niños severos y dos Niñas débiles.

Cuando se presenta el ENSO en anomalía cálida, la humedad del suelo aminora sus reservas y el umbral de conexión aparece a través de los caminos preferenciales del agua que producen las fracturas en las rocas. Se activa la conexión que produce que  $dV + P$  equilibre el sistema. Al ser en rocas, el movimiento del agua entre las cuencas es rápido, lo que mantiene los requerimientos de balance hídrico entre las cuencas

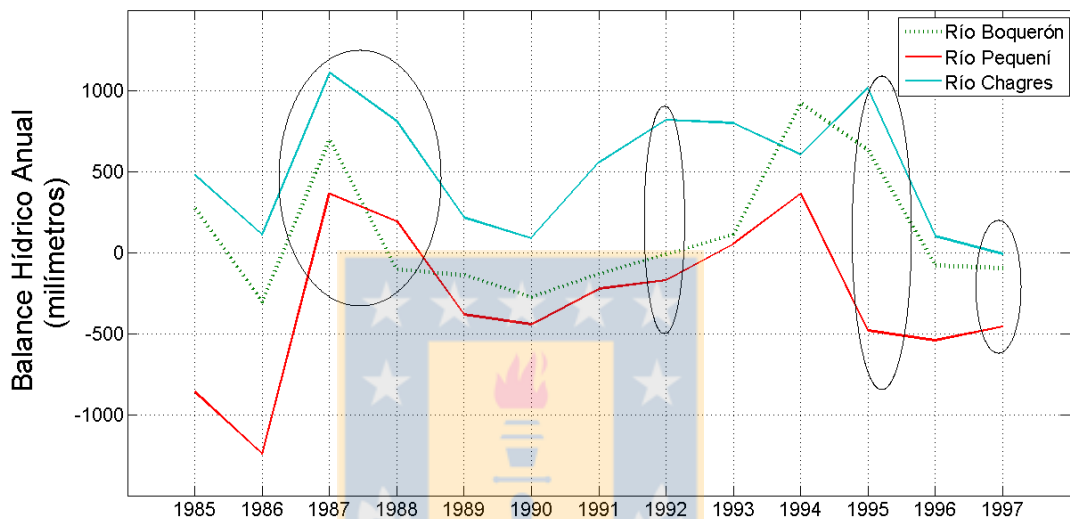


Figura 7.4. Balance Hídrico anual cuenca alta canal de Panamá. Se indica el cambio en el almacenamiento para los años de anomalía cálida 1987, 1988, 1992, 1995 y 1997. Durante estos años el comportamiento del cambio anual ( $\Delta S$ ) es similar en las cuencas del río Chagres y río Pequení. Sin embargo cuando el ENSO cálido es severo (1997) el comportamiento del cambio presenta similar patrón en las tres cuencas.

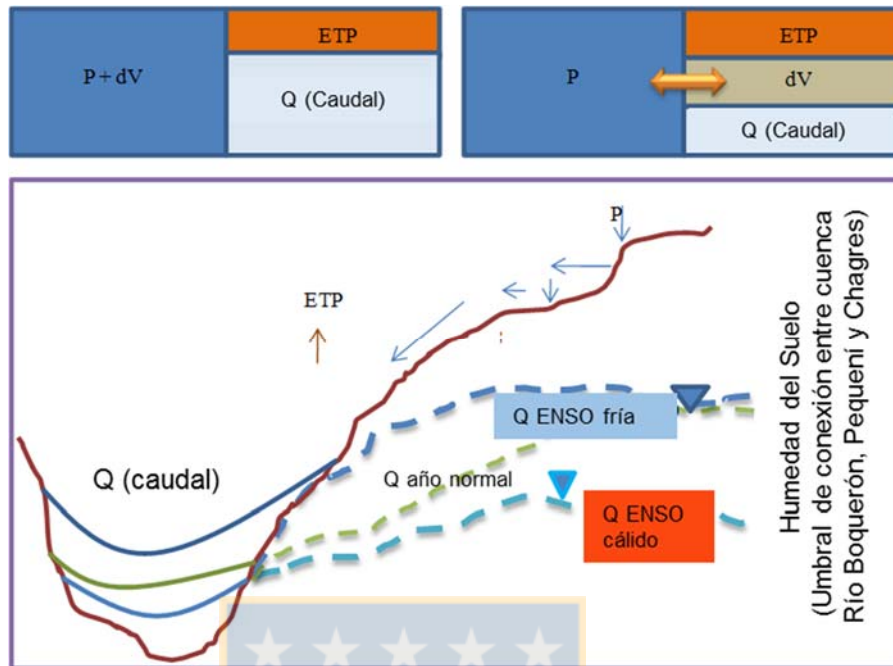


Figura 7.4a. Conexión del Umbral entre las cuencas Río Boquerón, Pequení y Chagres. Se muestra el probable comportamiento producido por la presencia del ENSO en anomalía cálida y fría. En anomalía fría la precipitación ( $P$ ) aumenta por lo que la humedad presente en el suelo es mayor, satisfaciendo los requerimientos de agua en el sistema: manteniendo un umbral de conexión inexistente entre las cuencas ( $Q$  ENSO fría).

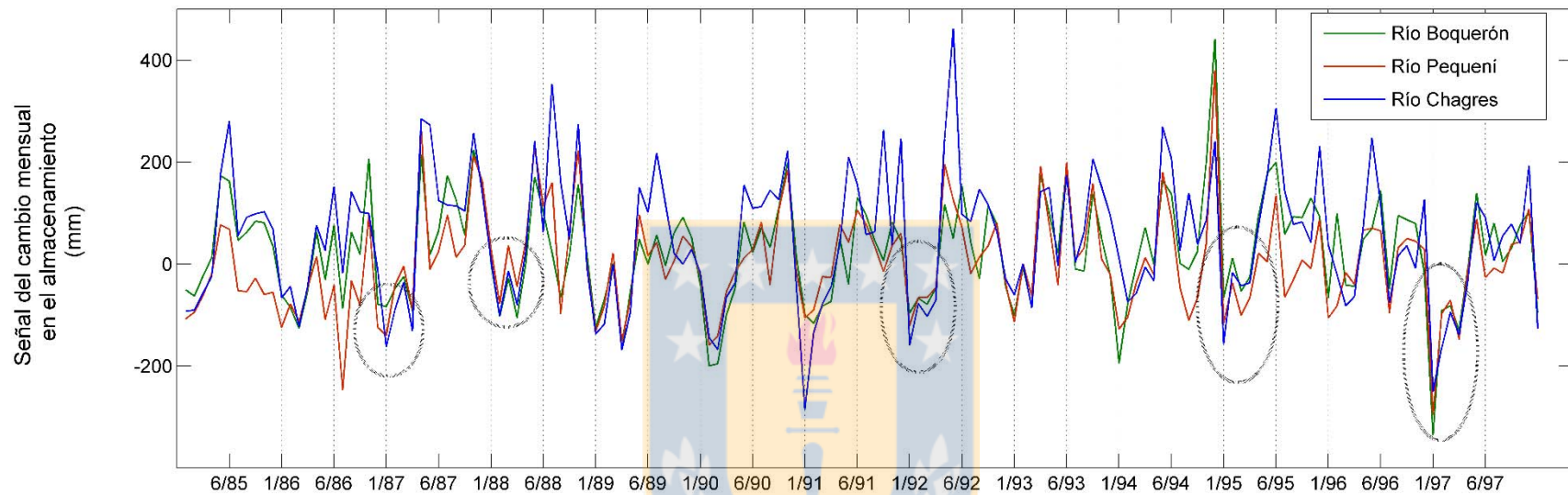


Figura 7.5. Patrones de la señal del cambio mensual en la cuenca alta del canal de Panamá. Esta imagen ha sido generada de forma escalada hacia abajo, es decir interpolada (downscaling) para mostrar si el comportamiento de la señal del cambio anual ocurre de igual forma a nivel mensual. Ciertamente, en los años de la anomalía cálida, las cuencas asemejan el mismo comportamiento en los meses de verano (estiaje) en la cuenca alta del canal de Panamá. Mientras que en la señal anual solo se observan comportamientos similares en el ENSO severo de 1997, la señal mensual muestra que en todos los meses de estiaje de los años ENSO con anomalía cálida, el comportamiento en el cambio del almacenamiento es similar en los río Boquerón, Pequeni y Chagres (cuenca alta del canal).

## Análisis de la curva de recesión

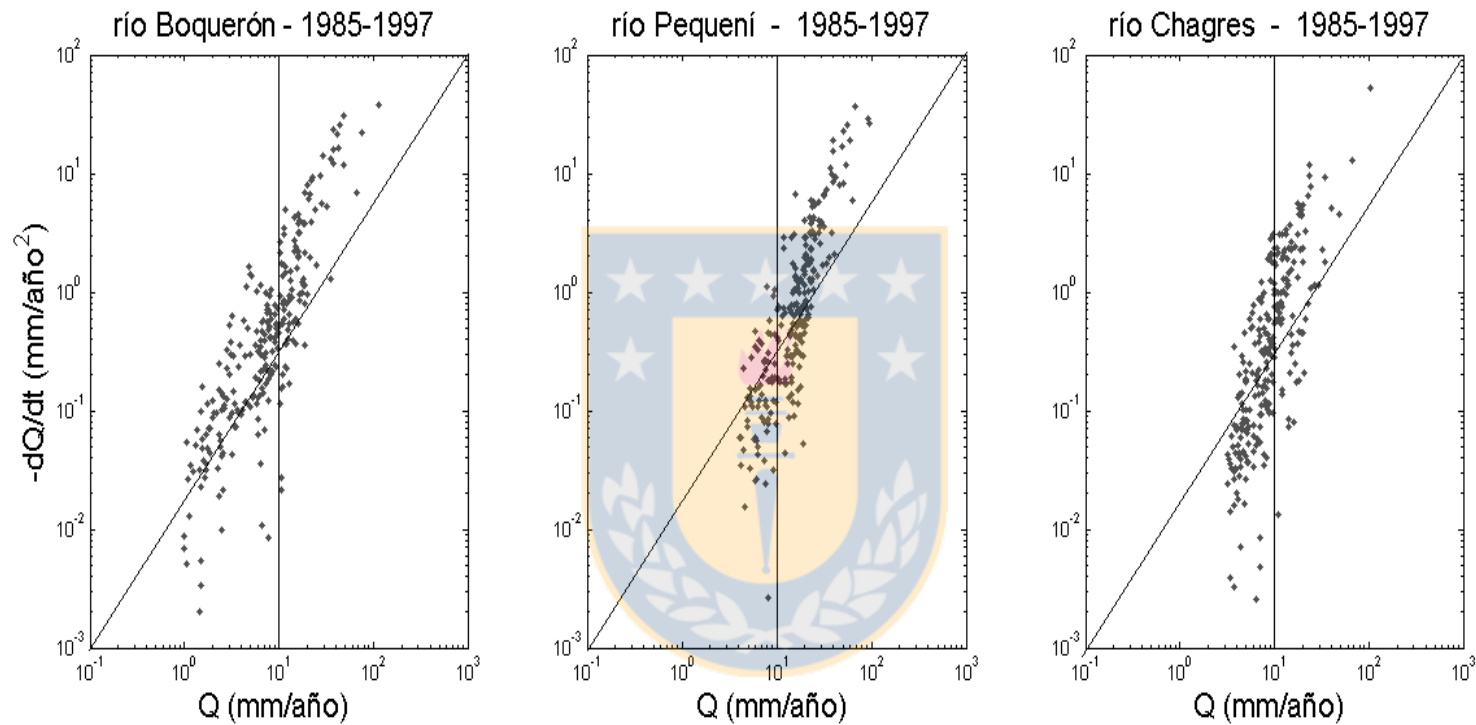


Figura 7.6. Curvas de recesión de la cuenca alta del canal de Panamá. El recuadro en color azul oscuro enmarca una zona de los gráficos, para vislumbrar la variación en el flujo subsuperficial (base) en las cuencas de los ríos Boquerón, Pequení y Chagres. El análisis que conserva la mayor verticalidad o estabilidad en la curva, es el del río Chagres. Le siguen en variación de estabilidad, el río Pequení menos estable que el río Chagres, y el río Boquerón mucho menos estable que el río Chagres. Lo que indica que existe una fluctuación en el flujo base de estas dos últimas cuencas más fuerte que en el río Chagres.



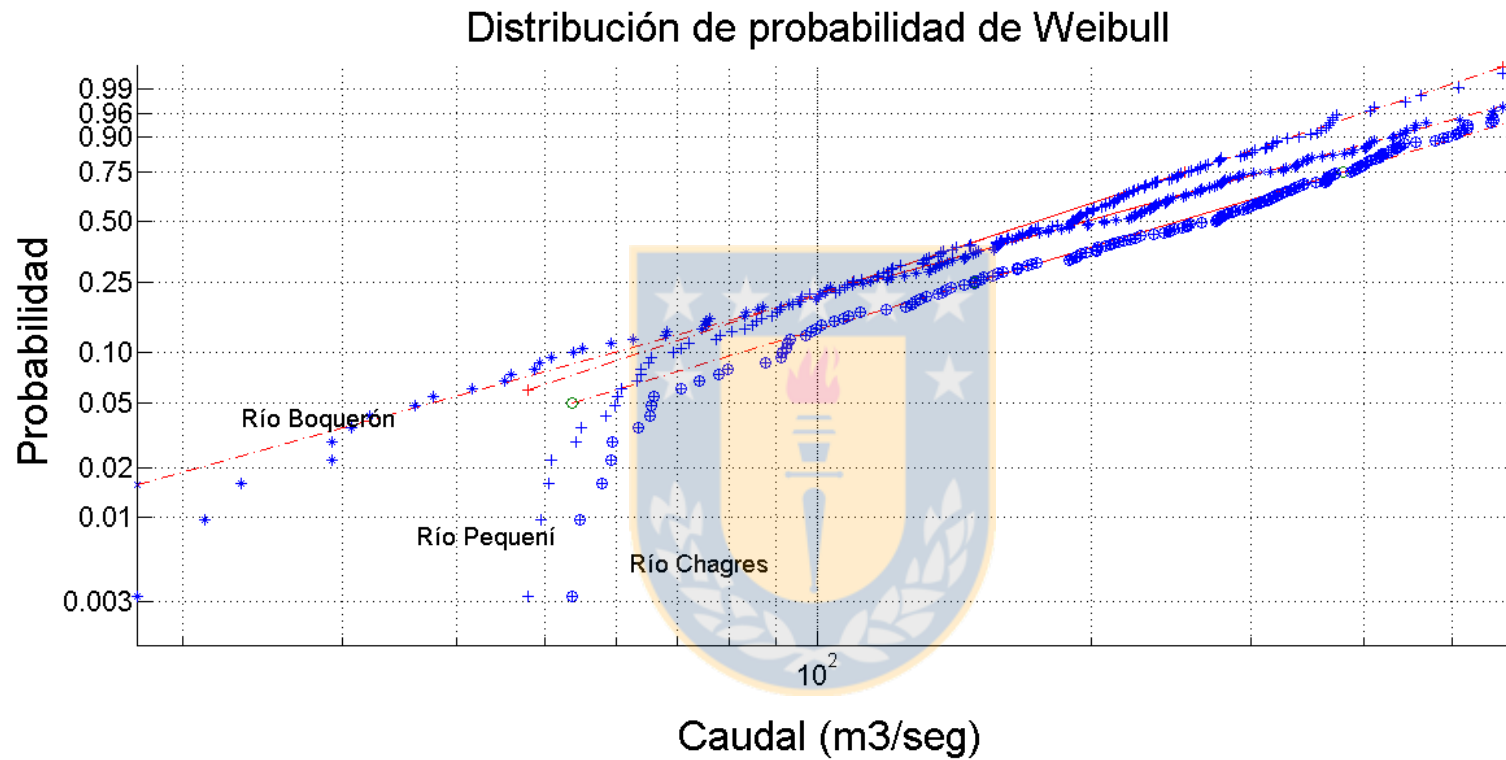


Figura 7.7. Distribución de probabilidad de Weibull. Se muestra el comportamiento en los valores de caudal de los ríos Pequení Chagres. Lo que incrementa la probabilidad de la conexión entre ambas cuencas por pertenecer al mismo bloque geológico (Bloque 1).

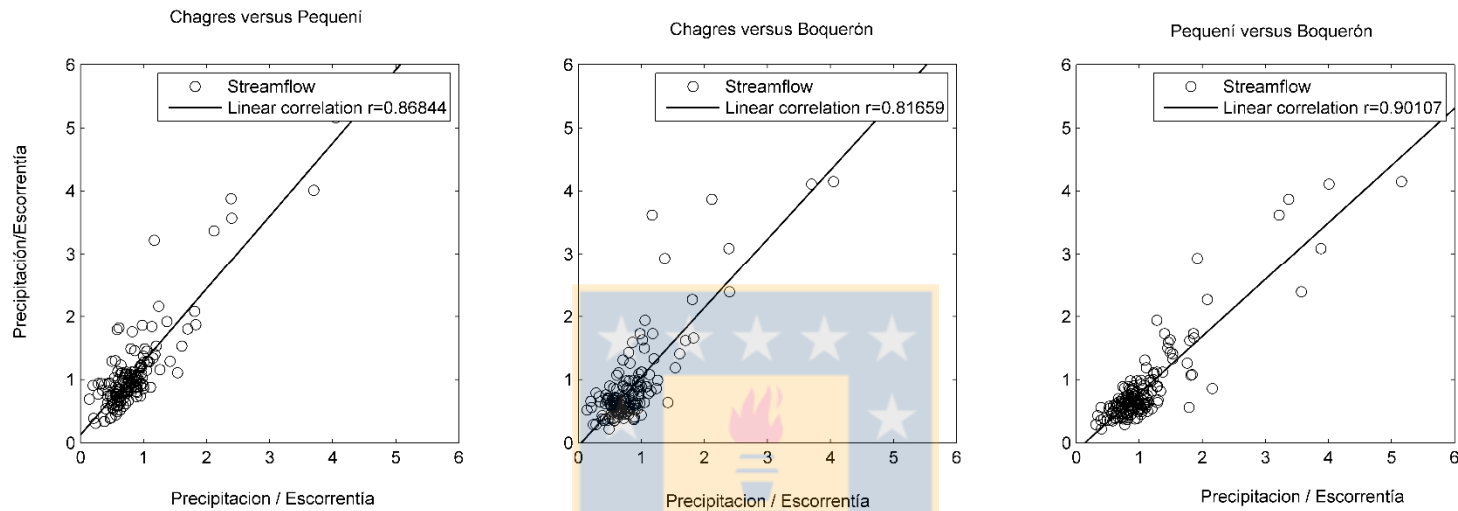


Figura 7.8. Relación precipitación/caudal (P/Q) de la cuenca alta del canal. La primera gráfica es la relación P/Q entre Chagres vs Pequení, la segunda entre Chagres vs Boquerón y la última es la relación entre Pequení vs Boquerón. Se observa que la relación P/Q es similar en las cuencas de los ríos Boquerón, Pequení y Chagres, cuando el valor no supera el umbral de 2.0. El río Chagres tiene una correlación de 0.86 con el río Pequení, siendo esta más alta que la que tiene con el río Boquerón. El río Boquerón está más correlacionado con el río Pequení. Su correlación es de 0.90.

## 6.2 Elaboración de un modelo perceptual – conceptual hidrológico de la subcuenca de El Río Chagres (OE2)

Con la descripción del área de estudio y los hallazgos del objetivo específico de esta investigación, se concluyó que es razonable considerar que la cuenca alta del canal está conectada sub-superficialmente. Esta conexión ocurre más claramente en el tiempo de estiaje de la cuenca que coincide con el fenómeno de El Niño. Utilizando de base lo descrito en la figura 3.1 de la cuenca drenada, se generó una imagen con distintas fotografías del área, específicamente de la cuenca del río Chagres, dado que es la más estudiada en el canal de Panamá. Los procesos de la figura 3.1, se superpusieron sobre el collage de imágenes (Figura 7.6) lo que generó el modelo perceptual de la cuenca del río Chagres. Posteriormente, se compararon los procesos hidrológicos perceptuales con los procesos conceptuales (insertos) en el modelo Brown, Ayala y Ferrer (Vega 2009) modificado por Muñoz (2010). La comparación llevó a la decisión de añadir los procesos hidrológicos obtenidos en el modelo perceptual para la cuenca del río Chagres. Se añadió un almacenamiento adicional de flujo subsuperficial (Figura 6.7), por la importancia demostrada en el análisis de la curva de recesión y los resultados del cambio en el almacenamiento, tanto anual como mensual, en el balance hídrico. Las ecuaciones que representan este cambio en el modelo conceptual Brown, Ayala y Ferrer fueron explicadas en la metodología (ver subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2 en las Figura 7.9 y 7.10) y de la percolación, debido el aumento de niveles de humedad en el suelo).

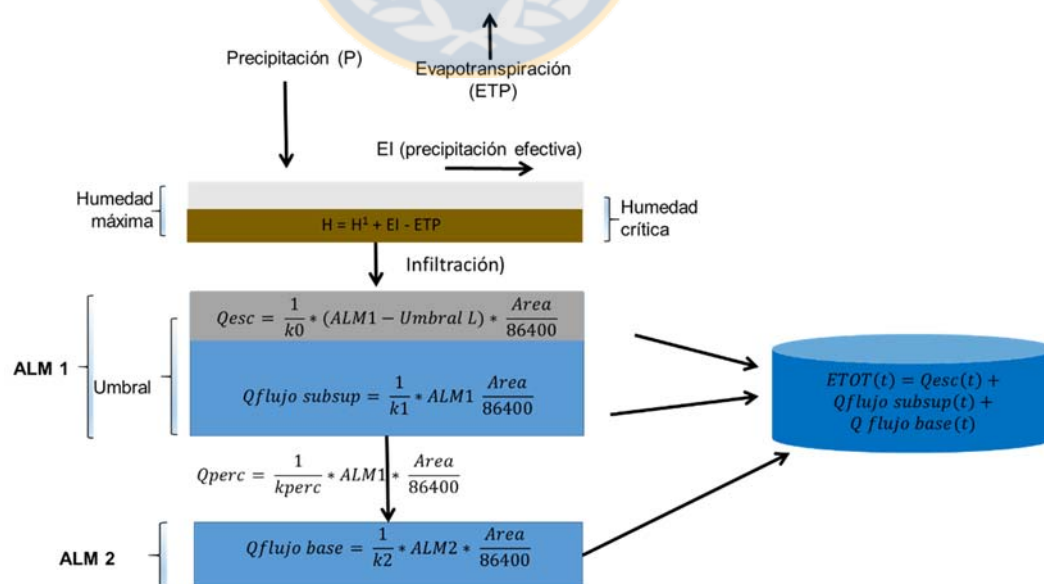


Figura 7.9. Modelo conceptual de la cuenca del río Chagres aplicable a la cuenca alta del canal de Panamá.

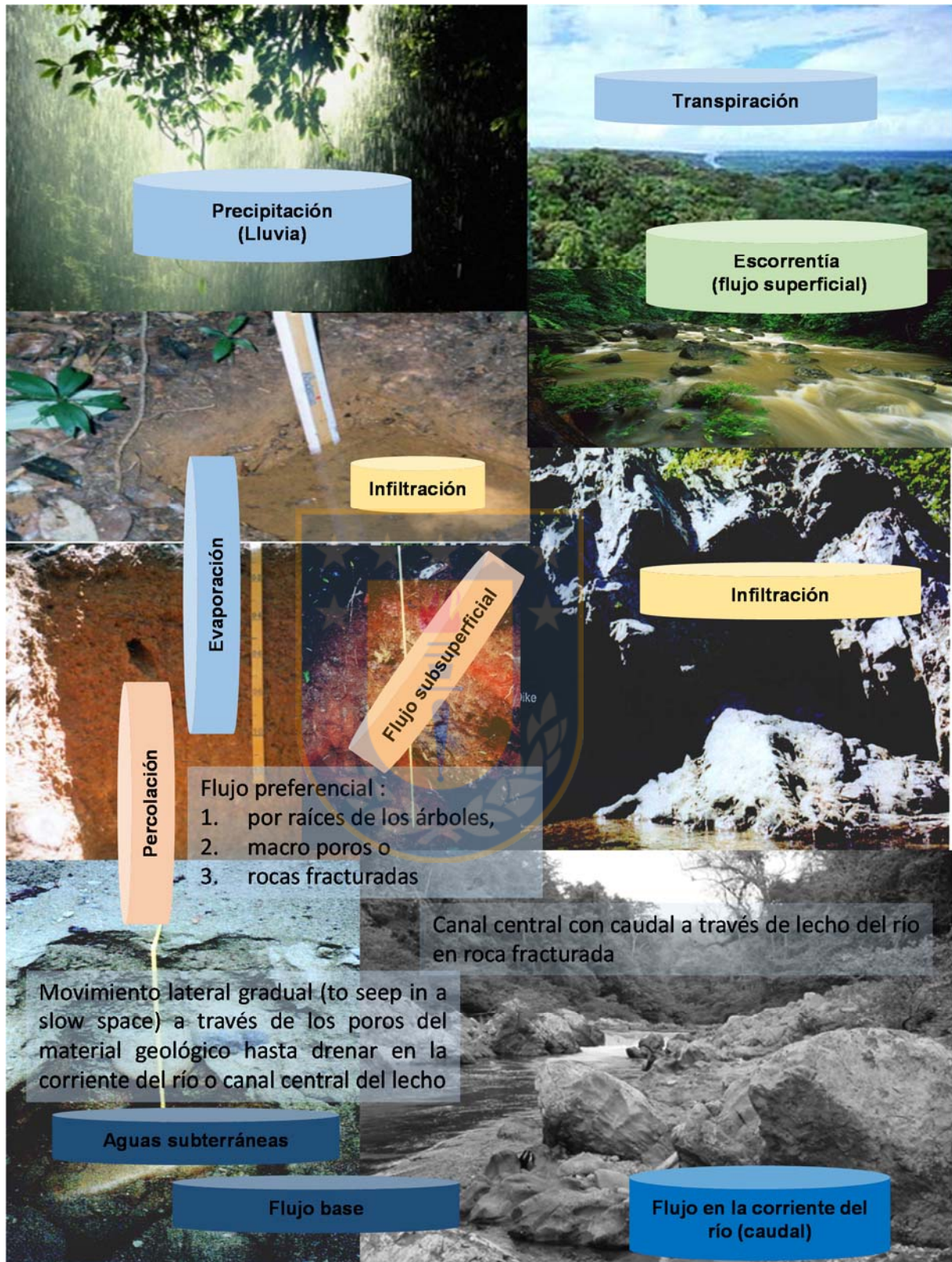


Figura 7.10. Modelo perceptual de la cuenca del río Chagres aplicable a la cuenca alta del canal de Panamá. Los procesos hidrológicos considerados en el modelo perceptual han sido sobrepuestos de los procesos conceptuales que se desarrollan en una cuenca drenada durante el ciclo hidrológico.

6.3 Aplicación del Modelo Brown, Ayala y Ferrer (BAF), adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz 2010, para simular el balance hídrico (OE 3), e identificar variables dominantes en los procesos hidrológicos en la cuenca del río Chagres que permitan agregar su parametrización en el modelo hidrológico.

La aplicación del modelo BAF mostró que durante la curva de recesión el ajuste de los datos observados era insatisfactorio (Figura 7.11).

Debido a la importancia demostrada en el balance hídrico y en el análisis de la curva de recesión se aplicó la modificación realizada en el objetivo específico 2 logrando un mejor ajuste en la curva de recesión del modelo de los datos simulados versus los observados. El mejor ajuste encontrado en el coeficiente de Nash Sutcliffe fue de 0.53. Aunque bajo en el ajuste, la arquitectura modificada del modelo logra representar la curva de recesión de la cuenca del río Chagres (Figura 7.12).

Identificación de variables dominantes e inclusión de su parametrización en arquitectura del modelo cuenca del río Chagres.

La modificación en la arquitectura del modelo BAF permitió identificar los procesos sub superficiales como procesos hidrológicos dominantes del balance hídrico en la cuenca del río Chagres, aplicables a la cuenca alta del canal de Panamá. Siendo sus variables descriptivas la humedad del suelo y la percolación. Esto se probó con cambio en la contabilización de la humedad del suelo lineal a no lineal y con el aumento de particiones del caudal antes de llegar al cauce del río en la subrutina de almacenamiento (ALM1 y ALM2) conectada por medio de la percolación (Figura 6.7, 7.10), debida el aumento de niveles de humedad en el suelo.

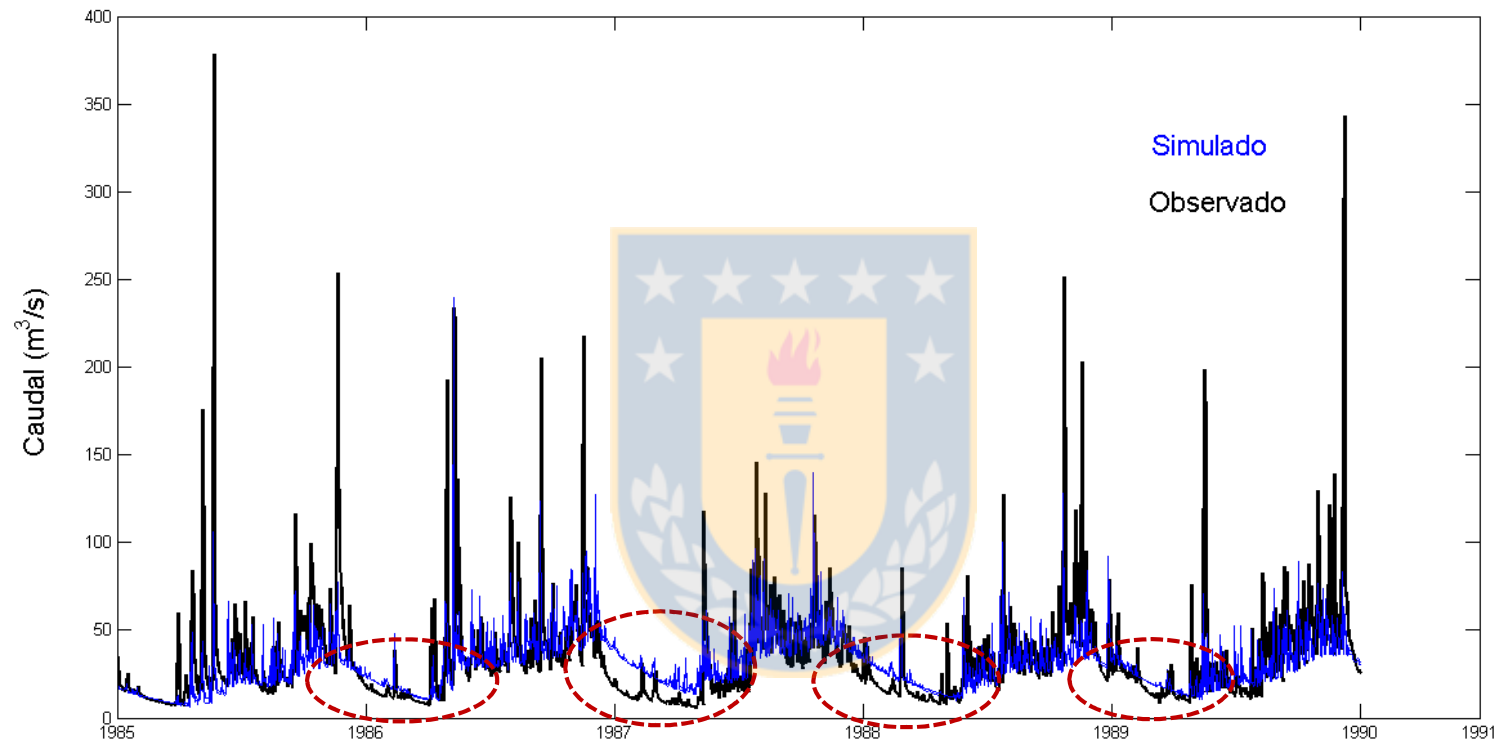


Figura 7.11. Simulación de los datos observados con el modelo Brown, Ayala y Ferrer (BAF), adaptado por Vega (2009) y modificado por Muñoz (2010) en la cuenca del río Chagres. Los valores observados carecen de ajuste en la curva de recesión y en los caudales extremos.

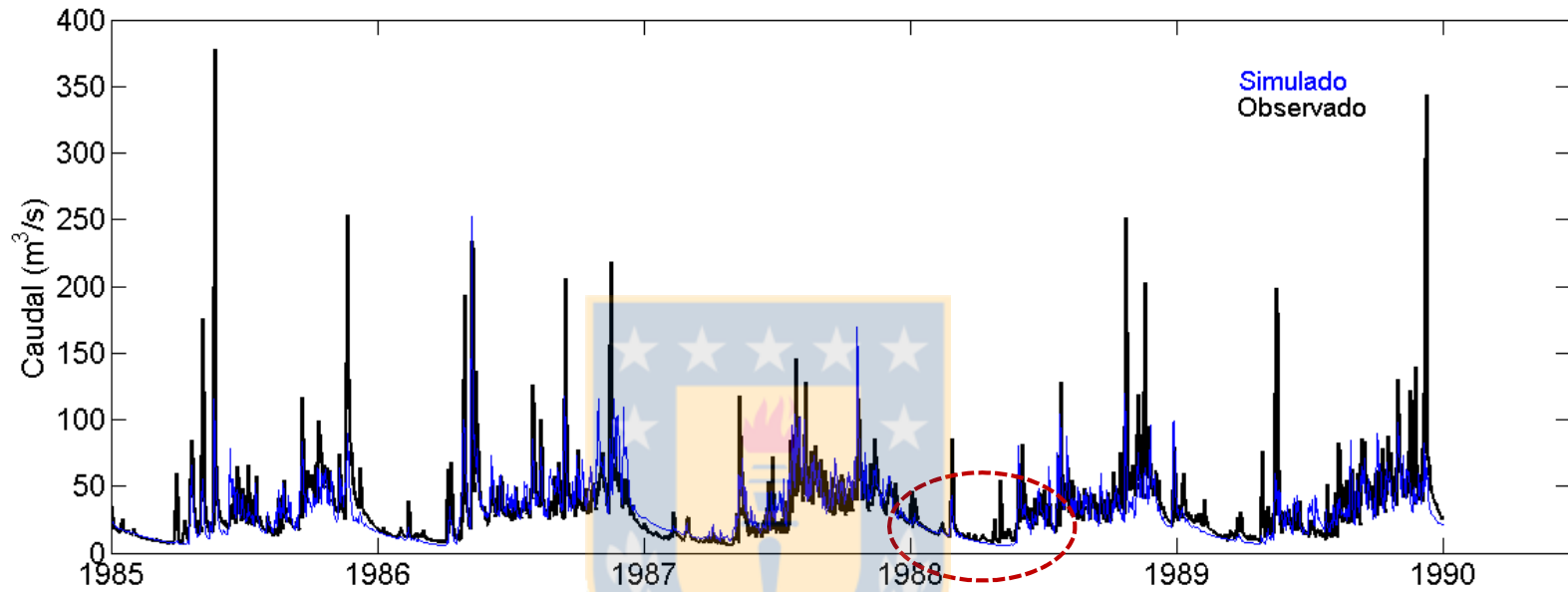


Figura 7.12. Simulación con la modificación al modelo BAF. La nueva arquitectura cuenta con dos parámetros más que el modelo original. Su parametrización se basa en añadir un almacenamiento más a la estructura, reflejando con ello la parametrización del proceso sub superficial en la cuenca, por la alta carga de humedad en el suelo.

6.4 Definición de variables a monitorear en la subcuenca del Río Chagres que coadyuven a la integrada de cuencas o gestión hídrica con bases en el desarrollo sustentable (OE4)

Dada la importancia de la gestión hídrica que coadyuve en la sostenibilidad de la cuenca del río Chagres, aplicable a la cuenca alta, se sugiere la creación de una matriz de exploración preliminar para recopilar en campo serie de datos de porosidad, litología, profundidad de roca madre, por mencionar algunas, que permitan continuar con el estudio de las variables identificadas en el objetivo específico tres.





## 8. Conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos a partir de lo perceptual conceptual se puede concluir que:

Los procesos hidrológicos dominantes en una cuenca de estudio son distintos dependiendo del clima y su geología. En el caso de la cuenca del río Chagres, el proceso dominante está directamente relacionado con la velocidad de percolación en el suelo.

En base a los procesos de percolación e infiltración que dominan la hidrología de la cuenca alta del canal, se debe desarrollar la arquitectura de un modelo. Siendo el río Chagres el de mayor relevancia, la propuesta para modificar el modelo Brown, Ayala y Ferrer (Vega 2009) modificado por Muñoz 2010, se enfoca el ajuste en la curva de recesión del río. Este ajuste se logró con la modificación de la ecuación de lineal a no lineal, al incorporar la precipitación efectiva. El coeficiente de Nash-Sutcliffe inicial sin modificaciones fue de 0.23 y con modificaciones de 0.53.

La arquitectura del modelo para el río Chagres, se basó en la conceptualización del sistema. Con la arquitectura propuesta se identificaron la humedad del suelo y la percolación como las variables descriptivas más importantes del proceso hidrológico de flujos sub superficiales en la cuenca alta del canal

Los umbrales de interconexión en la cuenca alta del canal de Panamá, dependen del fenómeno de El Niño, anomalía ENSO cálida, y de forma muy marcada en los eventos severos como el de 1997-1998.

Con información detallada de vegetación, geología y meteorología, en escala espacial y temporal, se logró un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos en la cuenca alta del canal al incorporar estas características en la arquitectura del modelo. Se incluyó el comportamiento no lineal en el suelo y se incorporó un doble almacenamiento de agua subsuperficial en el modelo (geología, flujos preferenciales, lluvias intensas y abundantes).

La cuenca alta del canal funciona como un sistema conectado de cuencas, por lo que su análisis debe ser realizado en conjunto.

La gestión hídrica del canal debe incluir en sus políticas de manejo, la comprensión del sistema de la cuenca alta como un todo. Tanto para el manejo de la cobertura vegetal, como la calidad y cantidad del recurso hídrico.

La modificación al modelo Brown, Ayala y Ferrer (1973) es una herramienta fácil de utilizar para enseñar los procesos hidrológicos en el área de ingeniería, carreras de posgrado y pregrado.

#### Futuras Líneas de investigación

Se sugiere continuar con el estudio en campo de las variables dominantes de la cuenca del río Chagres, río Pequení y río Boquerón, es por ello que se proponen algunas líneas de investigación en el tema:

1. Continuar con el análisis de las precipitación geodistribuida a partir del ENSO, anomalía fría, para estimar el cambio máximo en el almacenamiento durante el mismo periodo de tiempo mostrado en esta investigación.
2. Estudiar la calibración y validación del modelo modificado Brown, Ayala y Ferrer (Vega 2009) modificado por Muñoz 2010, con datos más recientes, para comparar el comportamiento del cambio en el almacenamiento.
3. Mejorar el ajuste del modelo modificado Brown, Ayala y Ferrer (Vega 2009) modificado por Muñoz (2010), para lograr la representación de los procesos en forma cuantitativa.

## 9. Bibliografía

ANAM 2000- Mapa de vegetación de Panamá. Autoridad nacional del ambiente. Gobierno de Panamá.

ACP, 2006. Isolíneas de Evapotranspiración Potencial en la Región Oriental de la Cuenca del Canal de Panamá. Autoridad del Canal de Panamá, Convenio de Cooperación ANAM –

ACP, 2007. Environmental Impact Study (EIS) for the Panama Canal Expansion Project – Third Set of Locks. Category III Environmental Impact Study. Panama Canal Authority. pp-3-33.

ACP 2008. Monitoreo de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Programa de Vigilancia de la Cobertura Vegetal. Región Oriental de la Cuenca del Canal. pp-119.

AghaKouchak A., Habib E., 2010, Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes, *International Journal of Engineering Education*, 26(4), 963-973.

AghaKouchak A., Nakhjiri N., and Habib E., 2013, An educational model for ensemble streamflow simulation and uncertainty analysis, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 445-452, doi:10.5194/hess-17-445-2013

Alley, W,M, 2002. Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science* 296, 1985 (2002); DOI: 10.1126/science.1067123. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org).

Aarst, E., Korst, J., 1989. *Simulated Annealing and Boltzmann Machines*. Wiley, Chichester.

Bárdossy, A., and J. Li (2008), Geostatistical interpolation using copulas, *Water Resour. Res.*, 44, W07412) doi:10.1029/2007WR006115.

Bergström S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, *The Swedish Meteorological and Hydrological Institute Report RHO 7*, Norrköping, 134 pp.

Bergström S, L.P. Graham, 1998. On the scale problem in hydrological modelling. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Norrköping, Sweden of Hydrology 211 (1998) 253–265.

Betancur, et. al., 2009. Conceptual hydrogeology model to Bajo Cauca antioqueño: a tropical aquifer system.

Beven, Keith J., 2001 Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. John Wiley & Sons Ltd. ISBN-0470-86671-3.

Beven K, M Kirkby. 1979. A physically based variable contributing area model of catchment hydrology', Hydrological Science Bulletin,24, 43-69

Beven K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. Journal of hydrology 320(1): 18-36.

Birkel C, D Tetzlaff, SM Dunn, C Soulsby. 2010. Towards simple dynamic process conceptualization in rainfall runoff models using multi-criteria calibration and tracers in temperate, upland catchments. Hydrological Processes, 24, 260-275.

Birkel C, DTetzlaff, SM Dunn, C Soulsby. 2011. Using lumped conceptual rainfall-runoff models to simulate daily isotope variability at two spatial scales in a nested agricultural catchment. Advances in Water Resources 34(3):383-394.

Bloschl, G., M. Silvapalan, 1995. Scale issues in hydrological modeling, a review. Hydrological Processes 9, p. 253, 257-258.

Burnash R, 1995. The NWS River Forecast System Catchment Modeling. In V Singh editions. Computer Models of Watershed Hydrology. Louisiana State University. United States of America. 311-366.

Clark M P, A G Slater, D E Rupp, R A Woods, J A Vrugt, H V Gupta, T Wagener, L E Hay (2008), Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models, Water Resources Research, 44, W00B02, doi:10.1029/2007WR006735.

Correa y Rivera, 2006. Modificación a la subrutina de evapotranspiración del modelo Brown, Ayala y Ferrer (1973). Apuntes de Hidrología aplicada. Universidad de Concepción. Chile.

Directiva 2000/60/ce del parlamento europeo y del consejo. 2000. Consultado en 7 Nov 2013. Disponible en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:327:0001:0072:es:PDF>

Dooge, J. C. I., The parametrization of hydrologic processes, Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models P. S. Eagleson, 243–288, Cambridge University Press, New York, 1982.

Dourojeanni A, A Jouravlev, G Chávez. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Santiago, Chile. CEPAL. 83 p.

Eagleson, P.S. (1978a) Climate, soil, and vegetation. 1. Introduction to water-balance dynamics. Water Resources Research 14, 705–712.

Eagleson, P.S. (1978g) Climate, soil, and vegetation. 7. Derived distribution of annual water yield. Water Resources Research 14, 765–776.

Escobar, Jaime. 2010. Personal communication. Postdoctoral visiting scientist. Center for Tropical Paleoecology and Archaeology. Smithsonian Tropical Research Institute, Panama

ETESA, 1998. Mapa Hidrogeológico de Panamá. Escala 1:1,000,000.00

FAO56. Food and agriculture Organization of the United Nations. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos: Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO riego y drenaje 56, 1988. Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith.

Ferrer P, E Brown, L Ayala. 1973. Simulación de gastos mensuales en una cuenca pluvial. En: II Coloquio Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago. Agosto. Departamento de Obras Hidráulicas, Universidad Católica de Chile.

Gafurov et al. 2006. Hydrological modelling for meso-scale catchments using globally available data. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 2209–2242, 2006. [www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/3/2209/2006/](http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/3/2209/2006/)

Gestión integrada de los recursos hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua. Universidad de Concepcion. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento de Recursos Hidricos, 2005.

Gupta and Nearing, 2014. Debates on Water Resources:Using Models and Data to Learn - A Systems Theoretic Perspective on the Future of Hydrological Science 'Accepted Article', doi: 10.1002/2013WR015096.

Harmon, R.S., 2005. An overview of the Panama Canal Watershed. In: Harmon, R.S. (Ed.). *The Rio Chagres, Panama – Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed*. Springer/Kluwer Publishers. 345 pp.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

Hewlett JD, AR Hibbert. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In Sopper W and Lull H eds. *Forest Hydrology*. University Park, Pennsylvania, . Pennsylvania State University p. 275-290

Hooper,RP, CA Shoemaker. 1986. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research* 22: 1444-1454.

Horton RE. 1932. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14: 446–460.

Hrachowitz, M., et al. 2009. Using long-term data sets to understand Transit times in contrasting headwater catchments. *Journal of Hydrology* 367(3–4): 237–248, DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.01.001

Jianzhong Wang and Konstantine P. Georgakakos, 2007. Estimation of potential evapotranspiration in the mountainous Panama Canal watershed. *Hydrol. Process.* 21, 1901–1917 (2007). DOI: 10.1002/hyp.6394

Kirkpatrick, S.; Gellatt, C. D.; Vechi, M. P. Optimization by simulated annealing. ***Science* 1983,220,671-680.**

Limbrunner, J.R., R.M. Vogel, and S.Chapra, A Parsimonious Watershed Model, Chapter 22 in *Watershed Models*, V.P. Singh and D.K Frevert editors, CRC Press, pp. 549-567, 2005.

Maidment D R. 1992. Hydrology. In Maidment ed. *Handbok of Hydrology*. New York, USA. McGraw Hill.

McCullough, 1977. *The path between the seas. The creation of the Panama Canal 1870-1914.* Simon and Schuster Paperbacks. New York.

McDonnell, J. J. 1990. A Rationale for Old Water Discharge Through Macropores in a Steep, Humid Catchment, *Water Resources Research* 26(11): 2821–2832, DOI:10.1029/WR026i011p02821

McDonnell, Jeffrey. 2003. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes* 17(9): 1869–1875 DOI: 10.1002/hyp.5132

McDonnell JJ. 2009. Classics in Physical Geography Revisited: Hewlett JD, Hibbert AR. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Progress in Physical Geography* 33(2): 1-6. DOI: 10.1177/0309133309338118

McNamara JP, D Tetzlaff, K Bishop, C Soulsby, M Seyfried, NE Peters, BT Aulenbach, R Hooper. 2011. Storage as a metric of catchment comparison. *Hydrological Processes* 25(21): 3364–3371 DOI: 10.1002/hyp.8113.

Melone et. Al., 2008. On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall–runoff modelling- *Hydrol. Process.* 22, 629–642 (2008). Published online 11 June 2007 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.6629

Metropolis, N.; Rosenbluth, A.; Rosenbluth, M.; Teller, A.; Teller, E. Equation of state calculations by fast computing machines. **J. Chem. Phys.** **1953**, **21**, **1087-1092**.

Miranda, Roberto. 2005. Geología en la Vecindad de las Fallas Río Gatún y Limón. Provincia de Colón, República de Panamá. Para la Sección de Geotecnia de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP)

Montanari, 2014. Debates. The future of hydrological sciences: A (common) path forward? Accepted Article', doi: 10.1002/2014WR015714

Mosley MP. 1979. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand, Water Resouces. Research, 15, 795-806, 1979.

Muñoz, E. 2010. Desarrollo de un modelo hidrológico como herramienta de apoyo para la gestión del agua. Aplicación a la cuenca del Río Laja, Chile. 54 p. Tesis de Master. Universidad de Cantabria, Escuela de Caminos Canales y Puertos, Santander, España

Muñoz-Villers, L. E., and J. J. McDonnell (2012), Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate, Water Resources Research, 48, W09528, DOI:10.1029/2011WR011316.

National Climatic Data Center. Data Documentation for Dataset 3102 (DSI-3102). Panama Canal Watershed-Hourly Climatological Data. October 10, 2003. 151 Patton Ave. Asheville, NC 28801-5001 USA.

Niedzialek, J.C., Ogden, F.M., 2005. Runoff production in the upper Rio Chagres watershed, Panama. In: Harmon, R.S. (Ed.), The Río Chagres, Panama – Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed. Springer, pp. 149–168.

Niedzialek, J.C., Ogden, F.L. 2010. First-order catchment mass balance during the wet season in the Panama Canal Watershed. Journal of Hydrology. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.07.044.

ONU. 2000. Declaración del Milenio. 2000. Consultado 01 Nov. 2013. Disponible en <http://www.un.org/spanish/milenio/ares552.pdf>.



Osorio Ugarte, H.I., 2006. Panama Canal Watershed Spatial Distributed Rainfall Maps 1965 – 1997. IWS Universitaet Stuttgart, 2007. Unpublished research.

Ogden, F. L., T. D. Crouch, R. F. Stallard, and J. S. Hall (2013), Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama, *Water Resour. Res.*, 49, 8443–8462, doi:10.1002/ 2013WR013956.

Pearce AJ, MK Stewart, MG Sklash. 1986. Storm runoff generation in humid catchments-I. Where does the water come from? *Water Resources Research*. 22: 1263-1272

Penman, H.L., 1963. Vegetation and Hydrology. Technical communication No.53. Commonwealth Bureau of Soils Harpenden.

Rivano, F. 2006. Report on Monthly Water Balance Simulation: the Ferrer, Brown & Ayala Model. Graduated Student – Departament of Water Resources, Universidad de Concepción. Chillán, Chile. (Documentos de clases, [dirivera@udec.cl](mailto:dirivera@udec.cl)).

Rivera, D. 2005. Influencia de la interacción entre agua superficial, subterránea y de riego en el transporte de contaminantes. Tesis Dr. Ing. Agric. Universidad de Concepción. Fac. Ing. Agric. Dr. Ing. Agric. Chillán, Chile.

Rivera, Diego (Editor) Chile: Environmental, Political and Social Issues. Nova Publisher, USA., 2012.

Rose, C.W. (2004). An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Sayama, T. et al., 2011. How much water can a watershed store? *Hydrological processes* 25, 3899–3908 (2011). Doi: 10.1002/hyp.8288.

Seibert, J. and Vis, M. J. P.: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3315–3325, doi:10.5194/hess-16-3315- 2012, 2012b.

Singh, V.P. 1989. Watershed modeling. Hydrologiva system. Volume I. Rainfall runoff modeling. Prentice Hall International, Inc. USA:

Singh, V. P. 1995. Watershed modeling. In Computer models of watershed hydrology, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1–22.

Sivapalan m., G. Blöschl, L. Zhang and R. Vertessy. Downward approach to hydrological prediction hydrological processes *Hydrol. Process.* 17, 2101–2111 (2003) published online in wiley interscience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). doi: 10.1002/hyp.1425

Sklash, M. G., R. N. Farvolden, The role of groundwater in storm runoff, *Journal of Hydrology*, 43, 45-65, 1979.

Staudinger M, K Stahl, <j Seibert, M P Clark, L M Tallaksen. Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3447-3459, DOI:10.5194/hess-15-3447-2011, 2011.

Tetzlaff D, C Soulsby, P J Bacon, A F Youngson, C N Gibbins, I A Malcolm. 2007. Connectivity between landscapes and riverscapes – a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrological Processes* 21, 1385-1389.

Tetzlaff, D, J Seibert, KJ McGuire, H Laudon, DA Burns, SM Dunn, C. Soulsby. 2009. How does landscape structure influence catchment transit times across different geomorphic provinces? *Hydrological Processes* 23: 945-953.

Thapa, P. 2010. Physically-based spatially distributed rainfall runoff modelling for soil erosion estimation. Doctoral Thesis. Stuttgart, Germany. Institute fürWasserbau. Universität Stuttgart.

Thorntwaite, C. W., 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94Published

Uchida T, S. Miyata, Y. Asano (2008), Effects of the lateral and vertical expansion of the water flowpath in bedrock on temporal changes in hillslope discharge. *Geophysical Research Letters*, 35, L15402, DOI:10.1029/2008GL034566.

UNESCO, 2006. 2° Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: "El agua, una responsabilidad compartida".

UNESCO. 2013. Programa Hidrológico Internacional (PHI). Consultado el 7 de nov. de 2013. Disponible en [http://webworld.unesco.org/water/ihp/index\\_es.shtml](http://webworld.unesco.org/water/ihp/index_es.shtml)

Wagner, T., Sivapalan M., Troch, P. and Wood, R., 2007. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1 (2007): 10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x

William M. Alley, *et al.* Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science* 296, 1985 (2002); DOI: 10.1126/science.1067123. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)

Vega L., 2009. Evaluación de la incerteza en el modelo de Brown, Ferrer y Ayala usando la metodología glue. Memoria de título presentada a la Facultad de ingeniería agrícola de la universidad de concepción, para optar al título de ingeniero civil Agrícola. Universidad de Concepción. Chile.

Ven Te Chow, *et. al.* Hidrología aplicada. 1994.

Westra, S., Thyer, M., Leonard, M., Kavetski, D. & Lambert, M., 2014, A strategy for diagnosing and interpreting hydrologic non-stationarity, *Water Resources Research* (accepted 27/05/2014)

Wörner, G., Harmon, R.S., Hartmann, G., and Simon, K., 2005, Igneous geology and geochemistry of the Upper Río Chagres Basin. in R. S. Harmon, editor. *The Rio Chagres: A multidisciplinary profile of a tropical watershed*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 65-81 pp.

Zhang X, G Hörmann, N Fohrer. 2008. An investigation of the effects of model structure on model performance to reduce discharge simulation uncertainty in two catchments, *Advances in Geosciences*, 18, 31-35, DOI:10.5194/adgeo-18-31-2008

