



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

Dirección General
de Hidrología

MAPAS

BALANCE

HÍDRICO

SUPERFICIAL

DEL

TITICACA

2011





Servicio Nacional de
Meteorología e
Hidrología

PRESIDENTA EJECUTIVA

Ing. AMELIA DÍAZ PABLO´

DIRECTOR CIENTÍFICO

Ing. EZEQUIEL VILLEGAS PAREDES

DIRECTOR GENERAL DE HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS

Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GÁLVEZ

RESPONSABLES

Ing. HÉCTOR VERA ARÉVALO

Ing. JULIA ACUÑA AZARTE

EQUIPO DE APOYO

Bach. BRENDA ESTHER NARVÁEZ TAYPE

Ing. GUILLERMO TATAJE SOSA

LIMA - 2011



INDICE

Pag.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

1.1.	INTRODUCCIÓN.....	7
1.2	OBJETIVOS.....	8
	1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
	1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	8
1.3	JUSTIFICACIÓN.....	8

CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1	DEFINICIONES.....	10
2.2	BALANCE HIDRICO.....	27

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

3.1	DESCRIPCION DEL ÁREA DE LA CUENCA.....	34
3.2.	DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS FISIOGRAFICOS.....	58
3.3	INFORMACIÓN REQUERIDA Y EQUIPOS.....	61
	3.3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	61
	3.3.2 PERIODO DE ANALISIS.....	62
	3.3.3 EQUIPOS.....	62
3.4	METODOLOGIA.....	
	3.4.1 TRABAJO DE CAMPO.....	63
	3.4.2 TRABAJO DE GABINETE.....	66

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	RESULTADOS.....	89
	4.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS FISIOGRAFICOS.....	89
	4.1.2 ANALISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLOGICA.....	81
	4.1.3 DETERMINACIÓN DEL BALANCE HIDRICO.....	108
4.2	DISCUSIÓN.....	111

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	116
5.2	RECOMENDACIONES.....	119

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA

6.1	BIBLIOGRAFÍA.....	120
-----	-------------------	-----

CAPITULO VII: ANEXOS

7.1	TABLAS.....	122
7.2	FIGURAS.....	144
7.3	MAPAS.....	171

ANEXO DE MAPAS

	Pag.
MAPA Ubi	MAPA DE UBICACIÓN 172
MAPA Cur	MAPA DE CURVAS DE NIVEL 173
MAPA Dem	MODELO DIGITAL DE ELEVACION 174
MAPA Cli	MAPA CLIMATICO 175
MAPA Hid	MAPA HIDROGRAFICO 176
MAPA Est	RED DE ESTACIONES 177
MAPA Gri	GRILLADO 178
MAPA Pmed DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN TOTAL 179
MAPA Pmin DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MINIMA 192
MAPA Pmax DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN MAXIMA 205
MAPA Tmed DEL 01 AL 13	ISOTERMAS MENSUALES DE TEMPERATURA MEDIA 218
MAPA Tmin DEL 01 AL 13	ISOTERMAS MENSUALES DE TEMPERATURA MINIMA 231
MAPA Tmax DEL 01 AL 13	ISOTERMAS MENSUALES DE TEMPERATURA MAXIMA 234
MAPA HR med DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE HUMEDAD RELATIVA 247
MAPA Hs med DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE HORAS DE SOL 260
MAPA V med DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE VELOCIDAD DE VIENTO 273
MAPA E med DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE EVAPORACIÓN DE TANQUE 286
MAPA ETo DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE EVAPOTRANSPIRCAIÓN DE REFERENCIA. 299
MAPA ETc DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE EVAPOTRANSPIRACION REAL 312
MAPA Esc DEL 01 AL 13	ISOLÍNEAS DE ESCURRIMIENTO 325

CAPITULO I: INTRODUCCION, OBJETIVOS, JUSTIFICACION

1.1 INTRODUCCION

La vida en la tierra comenzó en el agua, y actualmente el agua dulce da vida a las ciudades sedientas, irriga los campos de cultivos, produce la fuerza que mueve las centrales hidroeléctricas, es insumo importante en la industria, y es el hábitat de una multitud de seres vivos.

En los últimos cuatro decenios, se ha expresado una preocupación creciente por el aumento cada vez mayor de la demanda de este limitado recurso, en los sectores agrícola, industrial y doméstico. La escasez de agua, la contaminación, el suministro de agua potable en condiciones de seguridad y saneamiento adecuado, las alteraciones del ciclo hidrológico, así como las tensiones entre los países que comparten fuentes de agua comunes, son problemas que irán en aumento a medida que crezca la población mundial.

Ante este escenario, es responsabilidad de los gobiernos gestionar este recurso de manera sostenible para garantizar el desarrollo sostenible así como el bienestar económico y social.

El ciclo hidrológico gobierna caprichosamente la presencia del agua, que es decidida en cada momento por la latitud, la altura, vegetación, orografía, temperatura y la influencia de los océanos, así como por el tiempo y las actividades humanas. El agua que precipita de la atmósfera, brota del suelo en manantiales, es ofrecida por deshielos en la alta montaña, fluye por cauces fluviales y se acumula en vasos naturales, se deposita en grandes reservorios subterráneos o se encuentra y se funde con el mar en las desembocaduras de ríos y de lagunas costeras.

Pero cuando la disponibilidad del agua es discontinua o intermitente o cuando su exceso es causa de desastres por inundaciones y avenidas, deslizamientos de terreno, huaycos y sequías, entonces es necesario contar con esquemas adecuados y fiables de evaluación de los recursos hídricos para hacer frente a estos desafíos.

Con la finalidad de poder responder a la creciente demanda actual y futura de información sobre el agua y los conocimientos necesarios para el desarrollo sostenible, es indispensable conocer el comportamiento de las diversas variables que intervienen en el ciclo hidrológico (Precipitación, Evapotranspiración, Caudal) a través del **Balance hídrico superficial**.

La información obtenida en la determinación del balance hídrico es de gran utilidad en muchos campos de la investigación. Por ejemplo el conocimiento del

déficit de humedad es primordial para comprender la factibilidad de irrigación, ya que provee información sobre el volumen total de agua necesaria en cualquier época del año y entrega un valor importante sobre la sequedad. La información sobre los excedentes de agua y la cantidad por la cual la precipitación excede las necesidades de humedad cuando el suelo está en su capacidad de campo, es fundamental en todo estudio hidrológico, lo cual nos conllevaría a una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos, de tal forma que el desarrollo socioeconómico tenga como base el uso racional y armónico de sus recursos naturales.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

Proporcionar un documento que contenga información de los recursos hídricos superficiales de la Región Hidrográfica del Titicaca, que sirva como base para la planificación óptima de este recurso.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Estimar la disponibilidad neta mensual del recurso hídrico en las cuencas de la Región Hidrográfica del Titicaca a través del Balance Hídrico Superficial.

1.3 JUSTIFICACION

En el estudio se evaluarán las condiciones meteorológicas e hidrológicas de la Región Hidrográfica del Titicaca, con el fin de conocer su comportamiento y caracterizar cada una de las variables del ciclo hidrológico. Una vez realizado este proceso, se determinará el Balance Hídrico Superficial (BHS) de la cuenca, que nos permitirá conocer la disponibilidad del recurso hídrico durante todos los meses del año así como su uso y distribución en la zona de estudio.

Dicho balance, nos permitirá conocer la disponibilidad de agua superficial y planificar su adecuado manejo a nivel espacial y temporal, lo que además requiere conocer en qué forma y medida es actualmente usada, y propiciar la integración de las diferentes instituciones relacionadas con el manejo del agua.

En el sector agrícola, el balance contribuirá al desarrollo de una agricultura más eficiente y productiva mediante la selección de un adecuado método de riego que permita optimizar y aprovechar al máximo el recurso hídrico.

Según el censo 2007, la Población de departamento de Puno es de 1 268 441 habitantes, la densidad poblacional es de 17,6 hab/km², y la tasa de crecimiento anual de la población es de 1,13%, (<http://www.inei.gob.pe/>), lo cual implica, que

la demanda del recurso hídrico se incrementa todos los años. Asimismo las duras condiciones climáticas, con frecuentes eventos adversos como inundaciones, sequías, heladas y granizadas, la gran altitud en se encuentra la región unido al inadecuado aprovechamiento de los recursos naturales disponibles, hacen extremadamente difíciles las condiciones de vida de su población.

Los pobladores de la región tienen uno de los niveles más bajos de vida de Perú y Bolivia, que se dedican principalmente a la ganadería y agricultura de subsistencia y con alta tasa de migración hacia la costa del Pacífico (Lima, Tacna, Arequipa) o hacia la cuenca amazónica.

En base a lo descrito, es importante contar con un documento técnico que permita conocer el volumen de agua actual y el abastecimiento en un futuro próximo. El estudio hace posible cuantificar las zonas vulnerables, ocurrencia de huaycos, desbordes e inundaciones.

A nivel industrial y energético, se dispondrá de un estudio que brindará la disponibilidad de agua en la cuenca para su utilización en las industrias y en la generación de energía hidroeléctrica.

Los resultados obtenidos, permitirá disponer de información necesaria para optimizar el ordenamiento y gestión de los recursos hídricos por la autoridad correspondiente en cada una de las cuencas que conforman la Región Hidrográfica del Titicaca, el estudio Hidrológico proporciona información descriptiva de las características fisiográficas y morfológicas de la cuenca, asimismo evalúa y cuantifica la disponibilidad hídrica superficial permitiendo entender el funcionamiento hidrológico de las cuencas.

Es por ello que la elaboración, desarrollo y culminación del BHS, se justifica ya que es un elemento base para la planificación, el desarrollo de los pueblos y elevar el nivel de vida de las poblaciones asentadas en las cuencas de la Región Hidrográfica del Titicaca.

CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1 DEFINICIONES

- **Hidrología**

Es la ciencia que estudia el agua, y sus manifestaciones en la atmósfera, sobre y debajo de la superficie terrestre; sus propiedades y sus interrelaciones naturales (Guevara y Cartaya, 1991).

- **Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación.

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Chereque, 1989, se entiende como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso) como en su forma (agua superficial, sub-superficial, subterránea, etc.).

En la **Figura 2.1**, se muestra la representación del ciclo hidrológico.

- **Sistema hidrológico**

Guevara y Cartaya, 1991: los fenómenos hidrológicos son muy complejos, por lo que nunca pueden ser totalmente conocidos. Sin embargo, a falta de una concepción perfecta, se pueden representar de una manera simplificada mediante el concepto de sistema.

Un sistema viene a ser un conjunto de partes diferenciadas que interactúan como un todo. El ciclo hidrológico podría considerarse como un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escurrimiento, y las otras fases del ciclo, tal como se muestra en la **Figura 2.2**.

Precipitación Evapotranspiración

Figura 2.1 Representación del Ciclo Hidrológico

Fuente: Musy, André, 2001. Cours "Hydrologie générale". Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1. El ciclo hidrológico

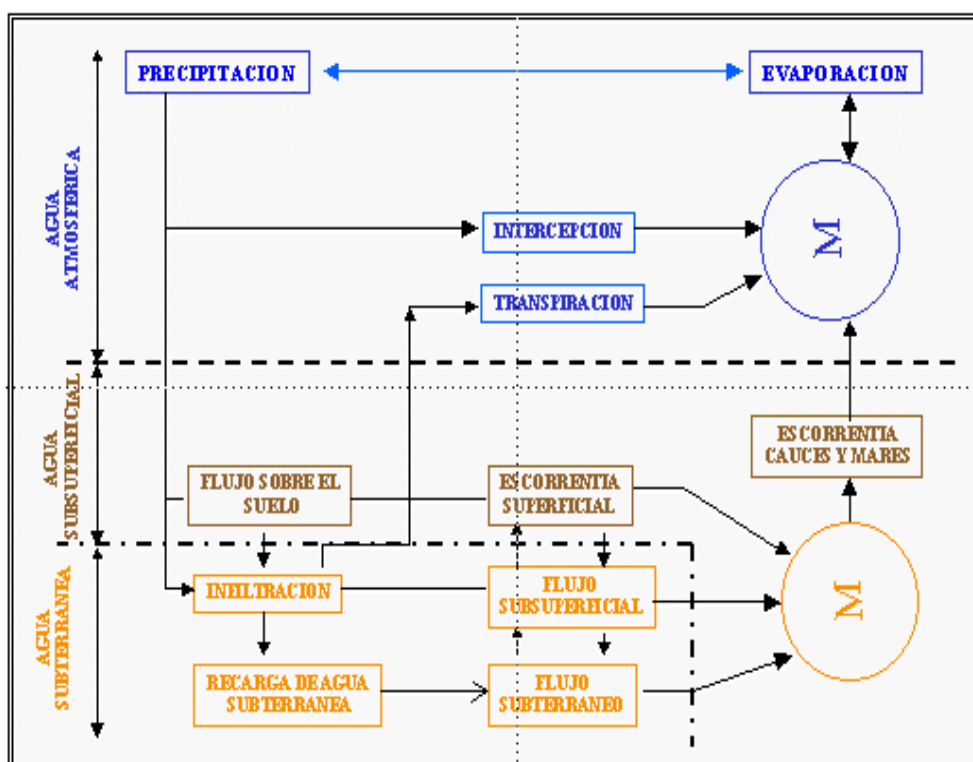


Figura 2.2. Representación del sistema hidrológico

Fuente: Monografía del MOP – CEDES, 1992a, Estrela

- **Año Hidrológico**

Período continuo de doce meses seleccionados de manera que los cambios globales en el almacenamiento sean mínimos, por lo que la

cantidad sobrante de un año al siguiente, se reduce al mínimo. En el Perú, el año hidrológico empieza en septiembre y termina en agosto del año siguiente.

- **Hidrograma**

Expresión gráfica de la variación del caudal a lo largo del tiempo.

Un hidrograma de caudal es una gráfica o una tabla que muestra la tasa de flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y escorrentía de una cuenca de drenaje particular.

Según Heras (1983), el hidrograma permite representar la variación del caudal de un río, en función del tiempo.

El hidrograma, esta en función del aporte de precipitaciones que puedan ocurrir en la superficie de la cuenca y de las características físicas de ella, tal como se puede apreciar en la **Figura 2.3**, donde se observa una comparación de dos hidrogramas en función de la forma de la cuenca. Es decir para este caso a mayor pendiente de la cuenca la respuesta del hidrograma es más directa.

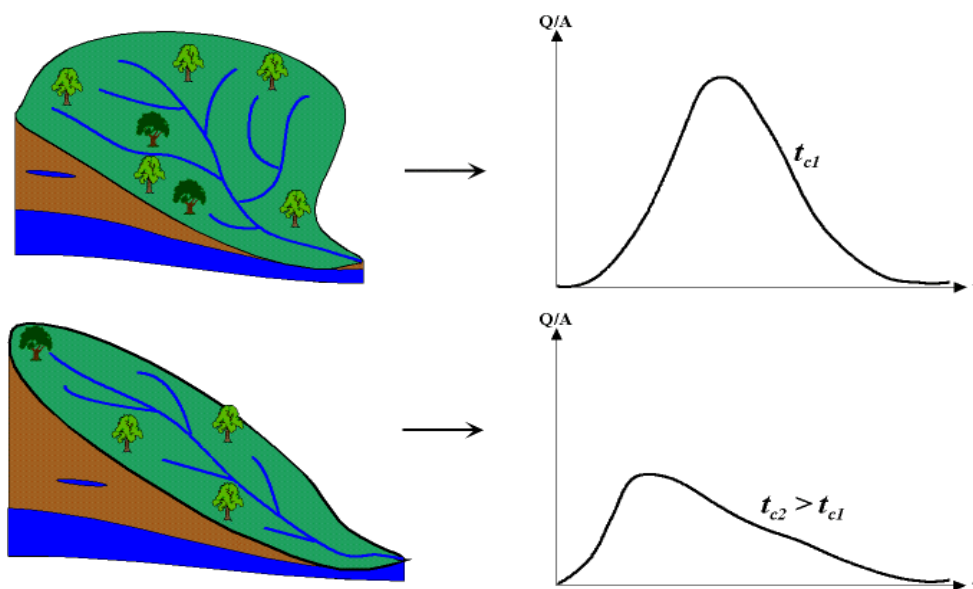


Figura 2.3. Influencia de la forma de la cuenca en el Hidrograma

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Estación limnimétrica**

Es aquella en la cual solo se registran los niveles de agua del río, para lo cual se cuenta con unas reglas (escala o miras) llamadas limnimétricas,

instaladas de forma recta o escalonadas en estructuras de concreto, con ella se realizan lecturas del nivel del río tres veces al día en época de estiaje y cinco veces en época de avenidas (en el caso del Perú, las lecturas se realizan cuatro veces al día y en el siguiente horario: 06, 10, 14 y 18 horas).

- **Aforo**

Operación por la cual se miden las velocidades, profundidades y anchos de las corrientes para determinar el caudal, mediante la utilización de un instrumento denominado correntómetro.

- **Balance hídrico**

Balance de entrada y salidas de agua en una zona hidrológica bien definida, tal como un embalse, un lago, o una cuenca, teniendo en cuenta el déficit o superávit de agua acumulada.

- **Caudal.**

Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo, tal como se aprecia en la **Figura 2.4**.

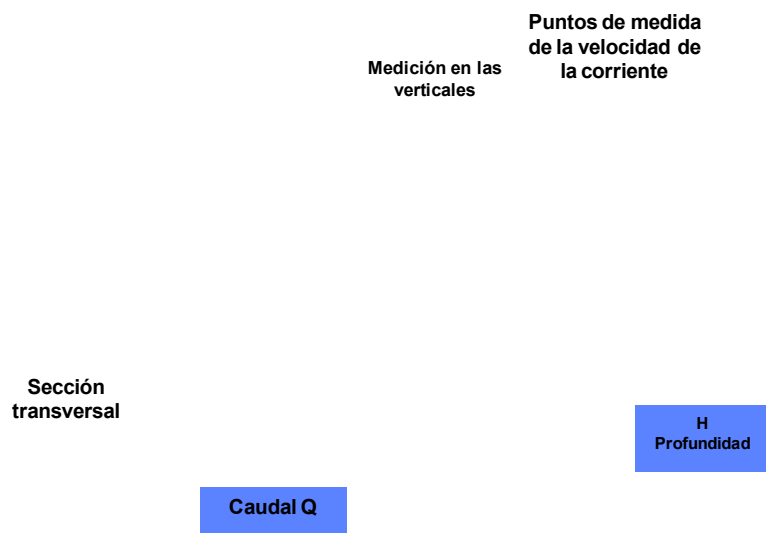


Figura 2.4. Caudal circulante a través de una sección transversal

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Curva de doble masa**

Curva de los valores acumulados sucesivos de una variable, medidos en un punto de la cuenca respecto de los valores acumulados comunes de la

misma variable, medidos en otro punto de la misma cuenca o región hidrológica.

- **Precipitación**

Se denomina precipitación, a toda agua meteórica que cae en la superficie de la tierra, tanto en forma líquida (llovizna, lluvia, etc) y sólida (nieve, granizo, etc) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc). Ellas son provocadas por un cambio de la temperatura o de la presión. La precipitación constituye la única entrada principal al sistemas hidrológico continental (Musy, 2001).

Para la formación de la precipitación se requiere la condensación del vapor de agua atmosférico. La saturación es una condición esencial para desbloquear la condensación. Los varios procesos termodinámicos son convenientes para realizar la saturación de las partículas atmosféricas inicialmente no saturadas y causar su condensación:

- Saturación y condensación isobárica (a presión constante),
- Saturación y condensación por presión adiabática,
- saturación y condensación por presión de vapor de agua,
- saturación por mezcla y turbulencia.

Existen diferentes tipos de precipitación: precipitación convectiva, precipitación orográfica y precipitaciones frontales, tal como se puede apreciar en la **Figura 2.5**.

Precipitación Convectiva. Resultan de una subida rápida de las masas del aire en la atmósfera. Se asocian a los cúmulos y cumulonimbus, desarrollo vertical significativo, y son generados así por el proceso de Bergeron. La precipitación que resulta de este proceso es generalmente tempestuosa, de corta duración (menos de una hora), de intensidad fuerte y de poca extensión espacial.

Precipitación Orográfica. Como su nombre indica (del griego oros = montaña), este tipo de precipitación se relaciona con la presencia de una barrera topográfica. La característica de la precipitación orográfica depende de la altitud, de la pendiente y de su orientación, pero también de la distancia que separa el origen de la masa del aire caliente del lugar del levantamiento. En general, presentan una intensidad y una frecuencia regular.

Precipitación frontal o del tipo ciclónico. Se asocian a las superficies de contacto entre la temperatura de la masa de aire, el gradiente térmico

vertical, la humedad y de los diversos índices del recorrido, que uno nombra Frentes. Los frentes fríos crean precipitaciones cortas e intensas. Los Frentes calientes generan precipitaciones de larga duración pero no muy intensas.

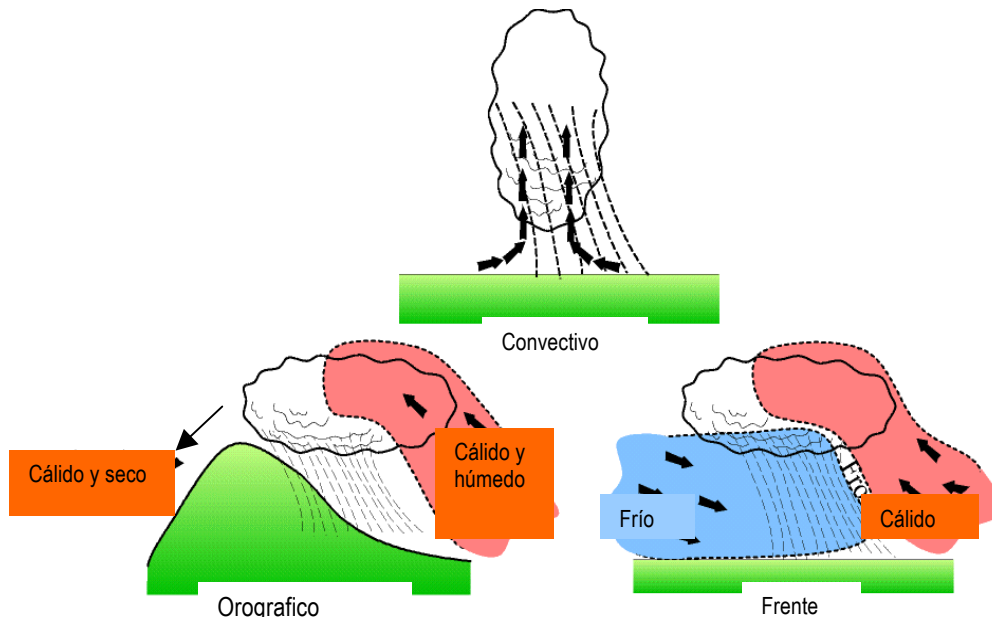


Figura 2.5. Principales tipos de precipitación: convectiva, orográficas y frontales

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Evaporación**

La evaporación es el fenómeno físico que permite a un fluido, convertirse en vapor o sea, en gas e incorporarse al aire. Es un fenómeno no conocido exhaustivamente y forma parte del ciclo hidrológico.

- **Transpiración**

Es la evaporación a través de las hojas. El proceso fisiológico de alimentación de las plantas se efectúa mediante el paso de ciertas cantidades de agua, portadoras de los alimentos, por el interior de ellas y ese tráfico solamente es posible gracias a la transpiración.

- **Intercepción**

Es la parte de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal (**Figura 2.6**) o los tejados, en general, parte de esta agua interceptada nunca alcanza al suelo porque se adhiere y humedece estos objetos, posteriormente se evapora.

- **Recarga del acuífero**

Proceso mediante el cual el agua ingresa al almacenamiento subterráneo del acuífero, el área de recarga es una zona que permite que se suministre agua al acuífero.

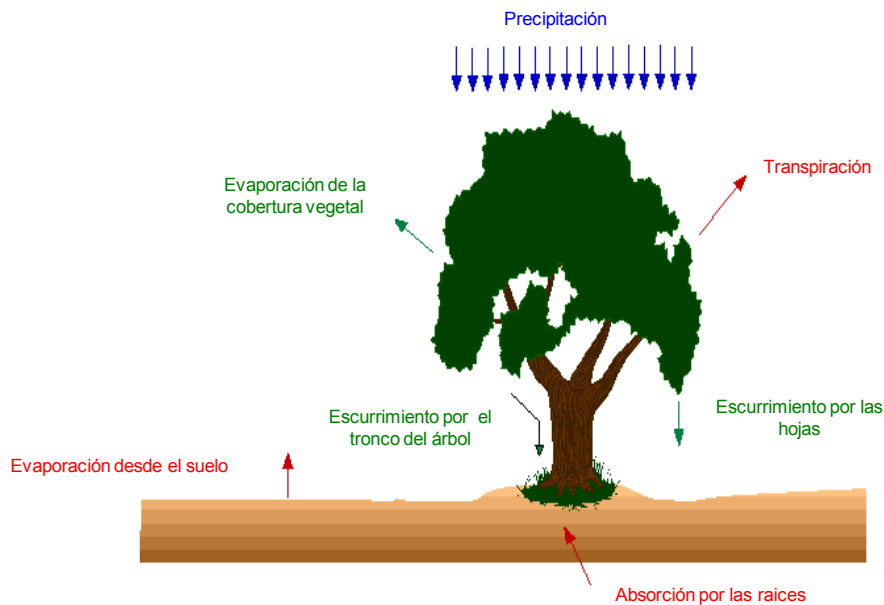


Figura 2.6. Principales componentes que intervienen en los conceptos de evapotranspiración e intercepción.

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Escorrentía superficial**

Es la porción de lluvia que no es infiltrada, interceptada o evaporada y que fluye sobre las laderas. En realidad la escorrentía superficial, la infiltración y la humedad del suelo son interactivas entre sí, por tal motivo se debe tener cuidado en seleccionar el modelo adecuado para cada caso.

- **Escorrentía subsuperficial**

Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por lo tanto debe ser considerada como parte de la escorrentía.

- **Flujo base**

Es la porción de agua derivada del almacenamiento subterráneo ó de otras aguas que se han retrasado en el tiempo y finalmente alcanzan el cauce (Sing, 1989) (**Figura 2.7**).

La representación de cada uno de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista físico, en donde se obtienen ecuaciones no lineales cuya solución analítica puede ser muy compleja o simplemente no se encuentra una solución. Sin embargo, mediante la discretización en el tiempo y en el espacio, la linealización de las ecuaciones fundamentales, de sus ecuaciones de estado y de las condiciones de borde es posible encontrar resultados aceptables, teniendo en cuenta que este tipo de simplificaciones inducen a errores de escala. Una representación conceptual de estos fenómenos es aceptada siempre y cuando se trabaje a la escala adecuada.

- **Cuenca Hidrográfica**

La cuenca hidrográfica se define como una unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación se reúne y escurre a un punto común o que fluye toda al mismo río, lago o mar. En esta área viven seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados (Sing, 1989).

Escurrentía subsuperficial

Nivel freático

Escurrentía superficial

Flujo de retorno

Figura 2.7. Principales componentes del agua que intervienen en los conceptos de detención, escurrentía superficial y subterránea.

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Subcuenca**

Unidad de drenaje de menor superficie que una cuenca y que forma parte de esta, constituyendo un tributario de la misma, o sea una cuenca que sale o que drena a una cuenca más grande (Sing, 1989).

- **Evapotranspiración**

Proceso mediante el cual el agua pasa de un estado líquido a un estado gaseoso a través de la transferencia de energía calorífica.

Es el total de agua convertido en vapor por una cobertura vegetal; incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por los estomas de las hojas.

La alta tasa de evapotranspiración de los bosques puede provocar que durante épocas relativamente secas el subsuelo sea más seco que el mismo tipo de suelo bajo otra cobertura. Si en estas condiciones ocurre un evento fuerte de precipitación, gran parte del agua infiltrada es usada para llenar la capacidad de almacenamiento del suelo, y no escurre superficialmente. Este fenómeno puede contribuir en ciertos casos a mitigar un evento de inundación (sobre todo en cuencas pequeñas). Sin embargo, de este fenómeno no se puede deducir que los bosques protejan contra inundaciones grandes.

La correcta determinación de la ETP es uno de los mayores problemas prácticos de la agrometeorología y su resolución contribuiría en gran medida al aumento de la efectividad de la agricultura, tanto de riego como de secano. En algunos países, la agricultura es la actividad que consume más agua, con una muy baja eficiencia, llegando a representar más del 85% del consumo total, lo que va acompañado de una eficiencia global del 30 al 40%; en general, se trata de una utilización excesiva del recurso (Martelo, 1986).

En condiciones tropicales el cálculo del balance hídrico hecho a partir de fórmulas de evapotranspiración presenta diferencias apreciables con el obtenido a partir de mediciones de humedad en el suelo. Entre otras cosas, estas diferencias se deben a que tales métodos no son representativos para aquellas condiciones, al haberse desarrollado en latitudes templadas. Por este motivo se considera conveniente disponer de una ecuación más adaptable al trópico, en especial para la faja latitudinal 15°N-15°S (García y López, 1970).

En la obtención de la misma se debe adoptar el criterio de utilizar los factores climatológicos de más fácil consecución. Para este orden de ideas, hay que analizar la disponibilidad de registros climatológicos de la región en consideración. Para nuestro caso conduce a los siguientes razonamientos:

- a) Existe una baja densidad total de estaciones climatológicas,
- b) Hay baja densidad de registradores de radiación solar,
- c) Los registros más abundantes son temperatura, humedad y evaporación.

Con referencia al apartado (b) se observa que los pocos registradores de radiación solar son aparatos mecánicos de relativa precisión que pueden incurrir en errores del 10%.

En lo que respecta al factor humedad relativa se considera más conveniente la utilización del valor medio de las horas diurnas ya que presenta varias ventajas en comparación con la humedad media diaria, así:

- a) La evapotranspiración es un proceso fundamentalmente diurno,
- b) El valor calculable por la expresión corresponde muy aproximadamente a la humedad relativa media de las horas diurnas. Estos valores son los únicos que presenta la mayoría de los boletines meteorológicos.

La evapotranspiración, es la combinación de dos procesos separados que originan pérdida de agua:

- **Evaporación:** es el proceso por el cual el agua líquida es convertida en vapor de agua (vaporización) y removida de la superficie evaporante.

La energía requerida para cambiar el estado de las moléculas de agua a vapor es la radiación solar directa, la temperatura ambiental del aire.

- **Transpiración:** Consiste en la vaporización del agua líquida contenida en las plantas y el vapor removido a la atmósfera. La pérdida del agua es a través de los estomas de las plantas.

La transpiración, depende de la energía radiante, gradiente de presión de vapor y viento, radiación, temperatura del aire, humedad del aire y viento. La razón de la transpiración también está influenciada por, la característica de la vegetación, aspecto del ambiente y práctica de cultivo.

La evaporación y transpiración ocurren simultáneamente que no es fácil de distinguirlos. Cuando la planta es pequeña, el agua perdida es por evaporación del agua en el suelo, pero cuando la planta va desarrollándose paulatinamente, la transpiración va cobrando mayor importancia en este proceso, tal como se puede apreciar en la **Figura 2.8**, donde se observa que el 100% de la ET es por evaporación y cuando la planta está en su máximo desarrollo sólo llega al 90% la transpiración.

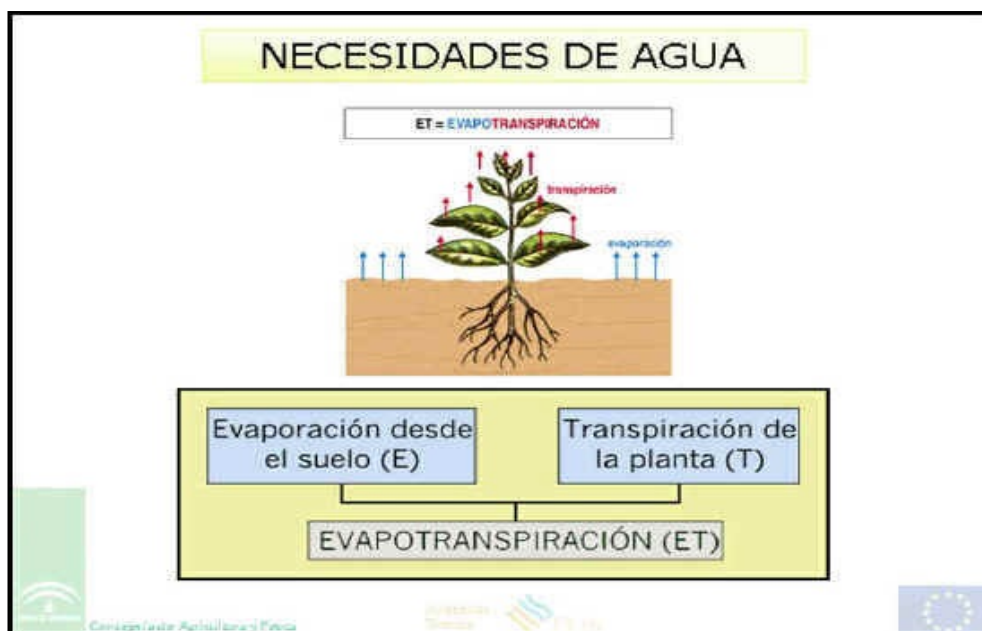


Figura 2.8. Componentes de la evapotranspiración

Fuente: Elriego.com. Cálculo de las necesidades diarias de agua, 2001
http://www.elriego.com/dom/informate/Calculos/indice_calcneces_tiemp_riegos.htm

El clima, característica de la planta, aspecto del ambiente y manejo, son los parámetros que afectan los procesos de evaporación y transpiración, tal como se puede observar en la **Figura 2.9**.

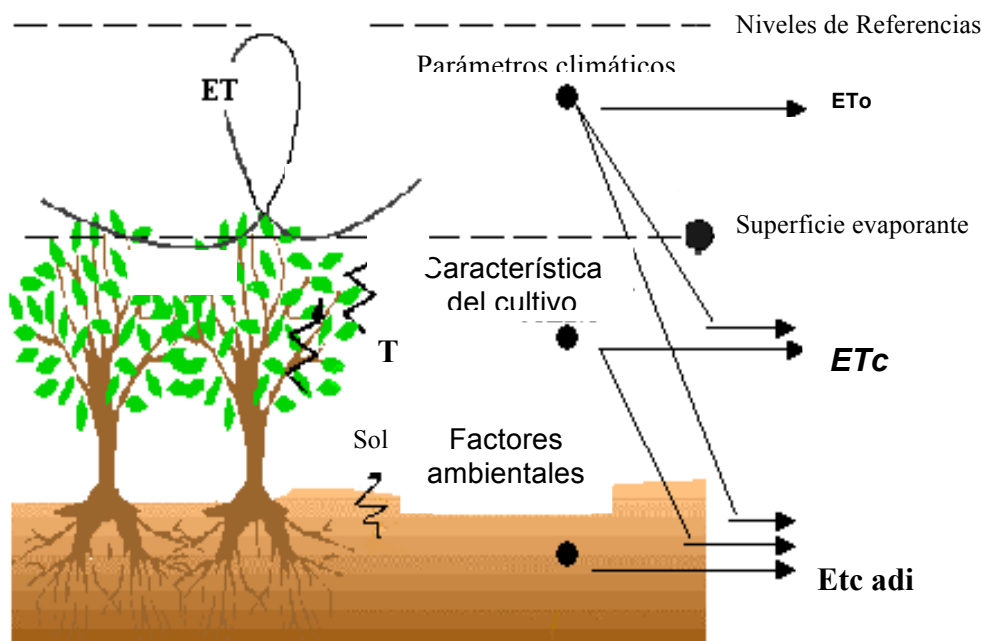


Figura 2.9 Factores que afectan la evapotranspiración

Fuente: Musy, André, 2001.

- **Parámetro clima**

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. El poder de evaporación de la atmósfera está expresado por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).

- **Factores del cultivo**

El tipo de cultivo, variedad y estado de desarrollo son considerados cuando se evalúa la evapotranspiración del cultivo. La resistencia de la transpiración difiere por la altura del cultivo, rugosidad del cultivo, reflexión del suelo cubierto y característica de las raíces de los cultivos, todo ello da como resultado diferentes niveles de ET en diferentes tipos de cultivo y bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones standard (ET_c), se refiere a la demanda de evaporación para cultivos que están creciendo en grandes campos bajo condiciones de agua óptima en el suelo, excelentes condiciones ambientales y de manejo.

- **Condiciones ambientales y de manejo**

Factores tales como salinidad del suelo, suelo poco fértil y de limitada aplicación de fertilizante, presencia de horizontes impermeables del suelo, ausencia de control de enfermedades y peste, y poco manejo de suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Otros factores a ser considerados cuando se evalúa la ET son: suelo cubierto, densidad de la planta y el contenido de agua en el suelo.

La evapotranspiración puede determinarse mediante medidas directas a base de evapotranspirómetros de pesada o lisímetros de drenaje (**Foto 1**), pero dadas las dificultades que encierra su instalación y lo costoso de ésta, la estimación indirecta de ET a base de fórmulas empíricas, seguirá siendo de gran utilidad (Cebas, 2000).

Los métodos de Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950) y Turc (1961), han sido los más comúnmente utilizados en nuestro país para el cálculo de la evapotranspiración. Hasta años muy recientes, la estimación de las necesidades de agua de los cultivos del regadío, se han basado en las valoraciones aportadas por tales métodos, principalmente el de Thornthwaite. Sin embargo, pese a su interés, actualmente se cuestiona su validez en condiciones de clima mediterráneo, ya que da valores de evaporación muy inferiores a los reales, con un error que puede llegar a ser del 40 - 50% por defecto.



Foto 1. Lisímetro de drenaje

Fuente: CEBAS. Murcia, 2000.

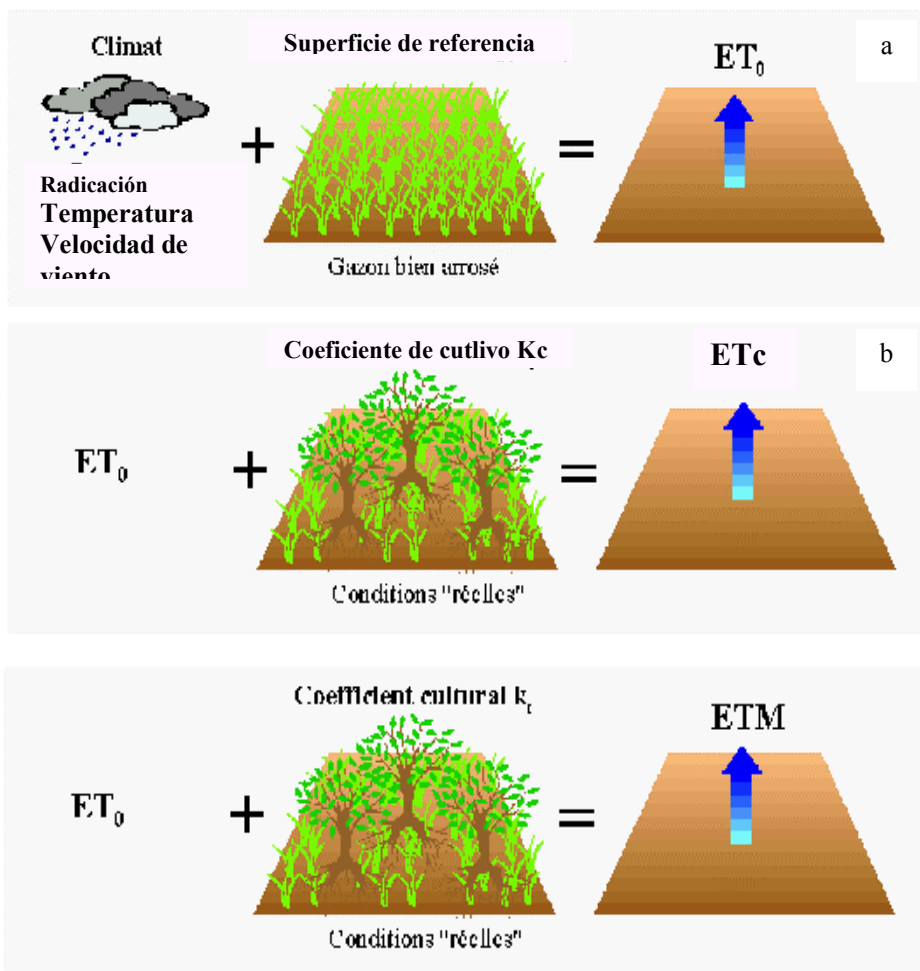
El problema de las fórmulas climáticas es su utilización en zonas diferentes a aquellas para las que fueron elaboradas.

Mayor precisión ofrece la fórmula original de Penman que mediante la combinación de dos términos, el de radiación y el aerodinámico (viento y déficit de saturación), permite expresar mejor las variaciones de ET a nivel local. Sin embargo, presenta la dificultad de necesitar información de estaciones meteorológicas muy completas (dada la complejidad de la fórmula), que son muy costosas y por tanto escasas, y presenta un margen de error aproximado de un 10-15% por debajo de la evaporación real.

Para dar mayor validez y precisión a las estimaciones de ET de la ecuación de Penman, superando al tiempo el ambiguo concepto de «evapotranspiración potencial », se desarrolló en la pasada década el concepto de **evapotranspiración del cultivo de referencia**, para el que se utilizan dos definiciones:

- La de la **FAO**, que define ET_o , como «tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de **gramíneas** de altura uniforme entre 8 y 15 cm. y que no escasea de agua».
- La de la **A.S.C.E.**, que define ET_r como «evapotranspiración máxima que se produce en un campo de cultivo de superficie rugosa, como **alfalfa**, entre 30 y 45 cm. y bien provista de agua». Esta experiencia sobre la anterior ofrece la ventaja de adaptarse mejor a los cultivos arbóreos más frecuentes en la Región Mediterránea. Sin embargo, se ha demostrado que en climas áridos, semejantes a algunas de nuestras regiones, subvalora la evapotranspiración en un 10%.

En la **Figura 2.10**, se puede observar la diferencia entre evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_0), evapotranspiración de cultivo bajo condiciones standard (ET_c) y evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no standard (ET_{cadj}). ET_0 es un parámetro climático que expresa la fuerza de evaporación de la atmósfera, ET_c se refiere a la evapotranspiración para un campo con un manejo excelente, extenso y disponibilidad de agua.



**Figura 2.10. a) Evapotranspiración de referencia (ET_0),
b) Evapotranspiración de cultivo condiciones estándar (ET_c),
c) Evapotranspiración de cultivo cond. no estándar (ET_{cadj})**

Fuente: Musy, André, 2001.

El concepto de la evapotranspiración de referencia, fue introducido en estudios sobre la demanda de la evaporación de la atmósfera independiente del tipo de cultivo, desarrollo y manejo de prácticas de cultivos y abundante cantidad de agua en la superficie.

Los únicos factores que afectan la ET_0 , son los parámetros climáticos, por lo tanto ET_0 es un parámetro climático y puede ser calculado con datos climáticos. ET_0 expresa la fuerza de evaporación de la atmósfera en una localidad específica en el tiempo y no considera la característica

del cultivo ni factores del suelo. La FAO, recomienda el método de Penman – Monteith solamente para determinar la ETo.

Los rangos típicos para valores de ETo para diferentes regiones agroclimáticas están dados en la **Tabla 2.1**. Esos valores propuestos no han sido obtenidos por aplicaciones directas.

Tabla 2.1. Promedios de ETo para diferentes regiones agroclimáticas en mm/día

Regiones	Temperatura media diaria en (°C)		
	Frío - 10 ° C	Moderad o 20 ° C	Caliente > 30 ° C
<u>Tropical y subtropical</u>			
- Húmedo y sub húmedo	2 - 3	3 - 5	5 - 7
- Árido y semi árido	2 - 4	4 - 6	6 - 8
<u>Templada</u>			
- Húmeda y sub – húmeda	1 - 2	2 - 4	4 - 7
- Árido y semi árido	1 - 3	4 - 7	6 - 9

Fuente: FAO, 1998

ETc, que es la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones standard, es aquella correspondiente a un cultivo libre de enfermedades, bien fertilizado, campos extensos en crecimiento, bajo condiciones óptima de agua en el suelo. El método de Penman – Monteith es usado para la estimación del cultivo de referencia standard y determinar el valor de la evapotranspiración ETo. Experimentalmente se determinó la razón de (ETc / ETo), llamado coeficiente de cultivo (Kc), que es usado para relacionar ETc a ETo o $ETc = Kc * ETo$.

ETc adj, conocido como la evapotranspiración de cultivo bajos condiciones no standard: suelo con vegetación bajo condiciones ambientales y de manejo que difieren de las condiciones standard. Cuando los campos de cultivos se cultivan, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse a ETc debido a condiciones no óptima, tal como la presencia de fertilizante, suelos salinos, baja fertilidad del suelo, déficit de agua o saturado de agua. Todas estas condiciones dan como resultado un escaso desarrollo de la planta, baja densidad y puede reducir el valor de la ETc.

En 1948, Penman, combinó el método de balance de energía con el método de transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación en superficies libres de agua para registros climatológicos standard de horas de sol, temperatura, humedad y

velocidad de viento. También llamado método combinado y fue desarrollado por muchos investigadores y extendido a superficies cultivadas por un factor de resistencia.

El factor de resistencia, esta expresado mediante la combinación de dos factores: factor de resistencia aerodinámico y factor de resistencia superficial, tal como se puede observar en la **Figura 2.11**.

La resistencia superficial, r_s , describe la resistencia del flujo de vapor a través de las aberturas de los stomas, área floreal total y superficie del suelo. La resistencia aerodinámica, r_a , describe la resistencia de la vegetación dirigido hacia arriba y alrededor por la fricción del flujo de aire sobre la superficie de la vegetación. Aunque los procesos cambian en una capa de vegetación, también es complejo describir completamente mediante los dos factores de resistencia, pueden obtenerse buenas correlaciones entre los valores de la evapotranspiración medida y la calculada, especialmente para una superficie uniforme y con grass de referencia.

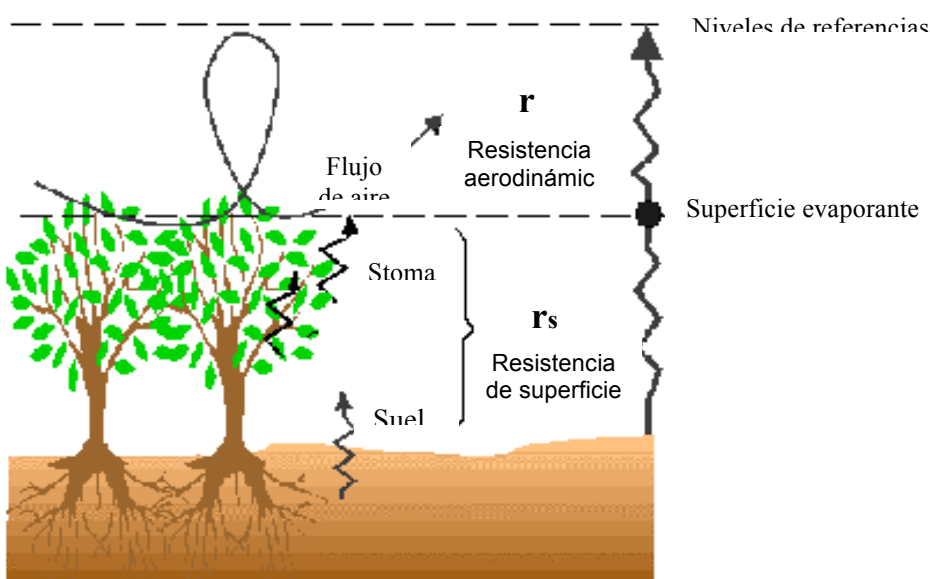


Figura 2.11. Resistencia superficial y aerodinámica del flujo de vapor de agua

Fuente: FAO, 56

La superficie de referencia, según los expertos de la FAO, está definida de la manera siguiente:

“Se asume que un cultivo de referencia es aquel que tiene una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0,23.”

La cuantificación de la ETo, mediante otros métodos indirectos más comunes, para determinar la evapotranspiración de referencia son (SIAR, 2001):

- Cubeta

- Blaney – Criddle modificado por FAO
- Hargreaves
- Papdakis
- Turc
- Penman – FAO
- Penman - Monteith

Los estudios comparativos entre los diferentes métodos llevados a cabo por FAO, se resumen de la siguiente manera:

Todos los métodos necesitan calibración in situ mediante lisímetros y técnicas de medición indirecta, métodos micrometeorológicos (relación de Bowen, el método del perfil, el método del torbellino, los métodos aerodinámicos combinados, el método sensorial remoto, etc).

Los métodos de radiación muestran buenos resultados en regiones donde el término aerodinámico es relativamente pequeño, pero la realización en condiciones áridas tiende a subestimar la evapotranspiración de referencia.

En el caso de los métodos que utilizan la cubeta de evapotranspiración claramente reflejan las insuficiencias de predecir la evapotranspiración del cultivo a partir de la evaporación de agua al aire libre. Los métodos son susceptibles a las condiciones microclimáticas bajo las cuales están las cubetas y el rigor del mantenimiento de la estación.

La relativa precisión y cumplimiento de la aproximación de Penman-Monteith tanto en climas áridos y húmedos ha sido indicado en los estudios de American Society of Civil Engineers (A.S.C.E.) y en estudios europeos.

El análisis de la realización de varios métodos de cálculo revela la necesidad de formular un método estándar para el cómputo de ETo. En el cálculo de la evapotranspiración de referencia se va a calcular Penman-Monteith debido al rigor en su planteamiento, a pesar de varias simplificaciones de su planteamiento teórico. Es un método con gran probabilidad de predecir ETo correctamente con un amplio rango de localizaciones y climas y tiene disposición para su aplicación en situaciones de falta de datos, por lo que será el método utilizado para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Además el tipo de estaciones con el que contamos nos ofrecen los datos necesarios para aplicar este método.

La representación de cada uno de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista físico, en donde se obtienen ecuaciones no

lineales cuya solución analítica puede ser muy compleja o simplemente no se encuentra una solución. Sin embargo, mediante la discretización en el tiempo y en el espacio, la linealización de las ecuaciones fundamentales, de sus ecuaciones de estado y de las condiciones de borde es posible encontrar resultados aceptables, teniendo en cuenta que este tipo de simplificaciones inducen a errores de escala. Una representación conceptual de estos fenómenos es aceptada siempre y cuando se trabaje a la escala adecuada.

2.2 Balance hídrico

Estrela, 1992; las entradas a la ecuación detallada del balance hídrico comprenden la precipitación total (P), como lluvia y nieve que alcanza el terreno, y las importaciones de agua exteriores al sistema, superficial (I_{ms}) y subterráneas (I_{ma}). Las salidas incluyen la evapotranspiración (ET) y los flujos superficiales (A) y subterráneo (F) que salen de los límites de la cuenca:

- **Entradas**

Los aportes naturales de agua recogidos por un territorio, cuenca en estudio (entradas al sistema) pueden tener dos orígenes:

Precipitaciones eficaces ($P - ET$)

Se obtiene sustrayendo la acción de la evapotranspiración (ET) y retenciones a las precipitaciones totales (P), y que a su vez provocan:

Escorrentía (E) inmediata en los cauces superficiales, Infiltración (I) que alimenta a los acuíferos subterráneos y a la parte subsuperficial.

Importaciones (I_m)

Proviene del agua exterior que pueden entrar en el sistema por la red fluvial (I_{ms}) o a través de acuíferos conexos (I_{ma}).

- **Salida**

Se define como aportación total (A_t) al flujo efluente de un determinado territorio y es la suma de:

Los caudales circulantes por los cursos superficiales de agua que abandonan el territorio considerado: Aportaciones de la red fluvial (A).

El flujo subterráneo que sale del territorio a través de los acuíferos existentes: Fugas subterráneas (F).

En la aportación de la red fluvial se puede distinguir el **componente superficial (As)** que proviene directamente de la escorrentía y el **componente subterráneo (Af)**, consistente en las salidas de aguas subterráneas a los cauces superficiales.

En los sistemas en que las importaciones de territorios conexos tengan importancia, es conveniente definir la **aportación total de origen interno (At - Im)** como la diferencia entre la aportación total y las importaciones.

- **Reserva**

La reserva es el almacenamiento natural de agua presente en un determinado territorio y en una fecha dada, pudiendo encontrarse:

En superficie: cursos fluviales, lagos, nieve, glaciares.

En el subsuelo, tanto en la zona no saturada, como en los acuíferos.

Las reservas varían con el tiempo de acuerdo con las diferencias que se producen entre los flujos de entrada y de salida del territorio considerado.

Se define como **reserva media** a la media de las reservas existentes en un sistema a lo largo de un período suficientemente extenso como para ser considerado representativo. Este período deberá cumplir la propiedad de que los flujos medios de entrada y de salida coincidan sensiblemente, lo que asegura un equilibrio en el sistema.

Estrela, 1992; cuando las entradas exceden las salidas, el total de agua almacenada en el territorio (S) se incrementa, y la expresión que engloba estos parámetros es:

$$P + I_{ms} + I_{ma} - ET - A - F - \Delta S = 0 \quad (2.1)$$

esta ecuación puede simplificarse o hacerse más compleja dependiendo de la disponibilidad de datos, finalidad del cálculo, tamaño del territorio y duración del intervalo de tiempo del balance.

Por ejemplo, si se establecen unidades territoriales que soporten balances hídricos prácticamente independientes, las importaciones y exportaciones a otros territorios serían nulas y si esas unidades tienen, además, una extensión importante, las salidas subterráneas al mar serían porcentualmente despreciables. Con esas hipótesis la ecuación (2.1) quedaría reducida a:

$$P - ET - A - \Delta S = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

P	→	Precipitación en mm.,
ET	→	Evapotranspiración en mm.,
A	→	Representa la salida superficial de la cuenca o aportaciones de la Red Fluvial, en mm.,
ΔS	→	Cambio de almacenamiento en mm.

La escala temporal hace referencia al intervalo de tiempo adoptado en la evaluación de recursos (día, semana, mes, estación, año) y a la longitud de las series de aportaciones.

El intervalo temporal viene condicionado por la futura gestión de cada sistema, que como mínimo precisa la simulación a escala mensual. La evaluación de aportaciones a escala inferior a la mensual (semanal, diaria) deberá realizarse solo cuando la propia especificidad del sistema lo requiera pues la disponibilidad de datos y su manejo y controlabilidad disminuye de forma notable.

2.3 ANTECEDENTES

- **Aquize, 1999**, “Conceptos – criterios: Fenómeno El Niño” <http://www.cepes.org.pe/webnino/docu1-cc.htm>, indica que la alta frecuencia de períodos secos en el sur andino y, particularmente, en la cuenca del lago Titicaca se refleja en la cronología mencionada por Aquize: En siglo XX, se produjeron grandes sequías en los años 1915, 1937-38, 1946, 1956-57, 1966-67, 1983 y 1990. De todas éstas, sólo la de 1983 se relaciona con El Niño. Adicionalmente, si se toma como referencia el nivel del lago, se agregan como años muy secos 1924, 1936 y de 1940 a 1943.
- **ALT, 2001** “Estudio de macrozonificación ecológica económica del sistema TDPS” se concluye que las precipitaciones anuales en el sistema TDPS varían entre 200 mm en la zona austral hasta 1,400 mm. en el norte, con valores máximos en el lago Titicaca, la distribución estacional de la lluvia es similar en toda la región: típicamente monomodal, con una estación lluviosa de diciembre a marzo y un período seco de mayo a agosto. Las precipitaciones anuales fluctúan en más del 50% respecto al promedio. Las temperaturas medias anuales del altiplano de la región oscilan entre 8 y 10°C, siendo más altas entre diciembre a marzo. Los valores mínimos medios mensuales varían de norte a sur entre -7 y -10°C. en cuanto a vientos, predominan las calmas aunque se han registrado velocidades de hasta 4 y 5 m/s respectivamente en la zona del lago Titicaca y en el área oriental de la región. La evaporación es muy alta, alcanzando valores

anuales medios de 1,450 mm cercas de y en el mismo lago Titicaca y 1,900 mm. por el sur del sistema TDPS.

- **Claverias R, 2003** “Conocimientos de los campesinos andinos sobre los predictores climáticos: elementos para su verificación”, manifiesta que, la campaña agropecuaria 1989-90 en el sur peruano fue afectada por una desastrosa sequía y heladas, las cuales redujeron drásticamente la producción agropecuaria. El factor meteorológico principal, que dio paso a estos efectos climáticos, fue el déficit de lluvias y las bajas temperaturas en el periodo agrícola (diciembre-abril). El siguiente año, 1990-91, se presentó poca precipitación pluvial, pero a diferencia del año anterior, las heladas y granizadas fueron menos intensas; por esa razón, la producción sobre todo agrícola no fue muy afectada por estos cambios.

En la campaña agropecuaria de 1989-90, según el Ministerio de Agricultura, por efecto de la sequía y las heladas en la papa, se tuvo una pérdida del 77% de la producción; la cebada y avena grano fueron afectados en 90% y el cultivo de la quinua fue afectado en 70%. En cambio, en la campaña de 1990-91, el clima fue caracterizado como "regular", y la producción agropecuaria no fue afectada como en el año anterior.

- **Comision de Comunidades Europeas, 1994**, “Plan Director Global Binacional de protección – prevención y aprovechamiento de los recursos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopò y Salas de Copaisa (TDPS), manifiesta que la parte norte del sistema TDPS (Sistema Titicaca, Desaguadero Poopò Salar de Copaisa) es mas afectada por la ZCIT (Zona de convergencia Intertropical), es la que recibe mas lluvia, ya que existe un gradiente norte-sur de precipitaciones, pero también existe un gradiente este-oeste, con menos lluvias en los llanos, debido años a la presencia de la cordillera oriental que resguarda la zona altiplánica de los vientos húmedos, y también porque la capacidad hidrométrica del altiplano (aire frío) es menor a la de los llanos (aire caliente).

La circulación atmosférica de la región se ve afectada con frecuencia por el fenómeno “El Niño”, algunos estudios demuestran la relación entre este y las perturbaciones de la circulación atmosférica que originan un reforzamiento del anticilon sur del atlántico y su desviación al norte, e determinadas épocas, situación que genero, por ejemplo las sequías de 1982 y 1983. Sin embargo en 1985 y 1986, sucedió lo contrario, donde la región soporto fuertes lluvias

- **Lavado Casimiro W, 2003**, realiza un estudio del impacto hidrológico del evento El Niño/La Niña en la vertiente del Atlántico y en la parte peruana del Titicaca , aplicando en su análisis de precipitaciones técnicas de sequías mediante IPN (Índice de precipitación normal) y el IPE (Índice de precipitación estandarizada) a nivel mensual y anual, caracterizando de esta manera los años secos y húmedos, concluyendo que con el IPE la vertiente

peruana del Titicaca presento un comportamiento normal en 1972 – 73 , en 1982 – 83 fue severamente seco , en 1991 – 92 se caracterizo por ser un año seco y en 1997 – 98 se presento un período moderadamente húmedo en esta región. Y con el IPN anual minimiza los eventos extremos, sin embargo a menor escala de tiempo se obtienen mejores resultados.

- **Mendoza Aparicio J,V, 1994** “ Altiplano – marco problemas y recursos propuestas, describe que la presencia reiterda de los fenómenos atmosféricos adversos, motivan que la producción de las cosechas, disminuyan o se anulen cada año, trayendo como consecuencia el desabastecimiento de alimentos y la secuela de males que este hecho puede ocasionar como: hambruna, desnutrición, enfermedades, robo, abigetao, migración y muerte.

La economía de la mayor parte de la población del altiplano, se sustenta en la explotación agropecuaria, la que se ve obstaculizada por las condiciones climaticas adversas, ocasionando que el nivel de vida de los campesinos sea de los mss bajos del país; razón por la cual los agricultotes se ven obligados a migrar en busca de recursos.

- **PNUMA, 2011**, Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico Titicaca-Desagaudero Poopo – Salasr de Coipsa (TDPS) GEO Titicaca, se indica que las inundaciones y las sequias son los eventos que mayores daños ocasionan a la población de la región. Así, en la segunda mitad de la década de los ochenta, varios años consecutivos de fuertes lluvias produjeron un fuerte aumento de los aportes al lago Titicaca, cuyo nivel fue ascendiendo progresivamente hasta llegar a anegar 48 000 ha. Los sectores más sensibles a las inundaciones se ubican en las cuencas bajas de los ríos Ramis e llave. En ambos casos se trata de regiones extremadamente llanas, que ocupan deltas de formación reciente y que documentos cartográficos históricos atestiguan que, al menos temporalmente, han llegado a formar parte del espejo del lago Titicaca. Estas zonas fueron las más afectadas por las recientes inundaciones, permaneciendo grandes extensiones anegadas durante meses y, en algunos casos, la situación se prolongó por varios años

En dicho estudio se concluye que se debe definir como prioridad nacional de ambos gobiernos la agenda regional de agua y saneamiento básico y ambiental, para contribuir a cerrar las brechas de desarrollo humano que distancian a la región del TDPS de los promedios nacionales respectivos. Dicha agenda debe incluir la dotación de agua potable para el consumo humano a las comunidades y poblaciones, la optimización de las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes y el desarrollo de las prioritarias que aún no existen, el reúso de aguas residuales en programas de riego con especies apropiadas y los programas integrales de gestión de residuos sólidos.

- ✓ Definir una agenda binacional para la preservación y promoción de la diversidad biológica y agrobiodiversidad de la región, incluyendo la reforestación de las áreas degradadas con especies nativas y la siembra masiva de totora en el litoral lacustre.
 - ✓ Definir una Estrategia Binacional de Desarrollo Turístico, que honre la majestuosidad compartida del paisaje natural y cultural de la región y la común historia de sus civilizaciones y pueblos originarios, dando particular atención al desarrollo del turismo comunitario.
 - ✓ Coordinar las agendas regionales de adaptación al cambio climático y gestión de riesgos de ambos países.
 - ✓ Promover la recuperación de las economías rurales tradicionales y la optimización de las tecnologías ancestrales, para un adecuado manejo de los recursos naturales de la región.
- **Rache Michel A, Jacques Bourges, Jase Cortes, Roger Mattos, 1998**
“Climatología e hidrología del lagon Titicaca” manifiestan que el clima de la cuenca del lago Titicaca, templado el día y frío la noche debido a la altitud, es el de una región de alta montaña sometida por su situación geográfica a un régimen tropical. La influencia de la imponente masa de agua se hace sentir por una reducción de las amplitudes de temperaturas y, en menor medida, sobre los valores de las temperaturas medias con relación a lo que deberían ser a tales altitudes. El lago, con aguas más calientes que el aire circundante, influencia también las precipitaciones que son máximas en su centro. Estas son esencialmente de diciembre a marzo, pudiendo presentar totales del simple al doble según los años.
Así, el régimen hidrológico es tropical, pero, sin embargo, con un escalonamiento del escurrimiento más pronunciado en las cuencas orientales donde los glaciares cubren las altas cimas. Los módulos pueden variar del simple al triple según los años, repercutiendo de manera amplificada la irregularidad interanual de las precipitaciones. El máximo de aportes fluviales, en retraso de uno a dos meses sobre las precipitaciones, tiene lugar durante la segunda mitad del verano, el 80 % vertiéndose en 4 meses.
El lago Titicaca, por su superficie y su volumen, y por su situación de altitud elevada en zona intertropical, es una originalidad hidrológica en el mundo.
 - **SENAMHI, 1970**, analiza las sequías en el departamento de Puno, con dos índices: Índice de la Desviación de la Precipitación y el índice de Palmer; donde concluyen que, de acuerdo al primero de ellos, las estaciones Tambopata y Pucara no presentan sequías, el resto de las estaciones presentan sequías moderadas y severas y; según el índice de Palmer la estación con mayor problema de sequía es Lampa.

Asimismo indica que existe una alta correlación entre la precipitación y la variación de los niveles del lago Titicaca, por lo que se puede señalar que es un buen indicador de la ocurrencia de sequías.

- **Senamhi, 2005**, “Estudio agroclimático de las condiciones hídricas en la sierra sur del Perú”... en análisis general define un parámetro sintético llamado “Duración del periodo de cultivo (DPC) que caracteriza con una base fundamental el tiempo durante el cual la disponibilidad de agua para los cultivos es suficiente, en dicho análisis se concluye que la zona suroeste es la parte mas seca del altiplano y la mas humeda es el noreste.
- **Suárez Alayza W, 2001**, realiza un estudio sobre la variabilidad pluviométrica a escala anual en las vertientes del Atlántico y Titicaca del Perú, donde analiza los valores centrados reducidos (VCR) de las precipitaciones con los valores del Índice de Oscilación del Sur (IOS), llegando a la conclusión que en el año 1982 – 1983 las precipitaciones en la cuenca del Titicaca fueron muy bajas, encontrándose al sur de la ciudad e Puno valores inferiores a -1 del VCR y al norte valores de $-0,5$ y $-1,5$. Y en el año 1997 – 98 las precipitaciones en la vertiente del Titicaca presentaron valores de VCR entre 0 y -1 . Asimismo indica que en promedio durante los años Niño, las precipitaciones en todo el Altiplano peruano tienden a disminuir en un rango de 0 y -1 de valor centrado reducido.

De otro lado Suárez , menciona que durante los años Niña, la cuenca del Titicaca presenta dos zonas bien diferenciadas una con excesos de precipitación con valores de VCR de 0 y 1 ubicada al sur de la ciudad de Puno y al norte con precipitaciones bajas cuyos valores de VCR entre 0 y -1 .

- **Tejada Cari A, 2009**, “Recurso Hidrico superficial para el desarrollo de la región Puno”, manifiesta que los ecosistemas del eje T. D. P. S. dependen para su mantenimiento de una manera fundamental de sus recursos hídricos. Sin embargo estos, varían de manera irregular, existiendo largos periodos de escasez (sequías), y algunos periodos de excesos que producen alteraciones importantes, inundaciones en algunas zonas o se constituyen en regeneradores de algunos sistemas degradados (lago Poopó, corrección de la salinidad, etc.)
- **Vera A, H, 2010**, en el artículo de la Revista Peruana Geo – Atmosferica “El Niño y lo caudales en la vertiente del Titicaca”, concluye que los caudales anuales no tienen una dependencia o relación directa entre fenómeno el Niño y la respuesta de los caudales. Asimismo el nivel de agua del lago Titicaca no guardan una relación directa ante el evento El Niño, ya que estos dependen de otros factores como: evaporaciónm lluvias sobre el espejo de agua, aportes en años anteriores y, desde hace algunos años se encuentran influenciados por el sistema regulado del sistema TDPS.

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE LA REGIÓN HIDROGRÁFICA

La Región Hidrográfica del Titicaca, es una cuenca endorreica, sin salida al mar, que se ubica en el extremo sur del Perú entre Perú y Bolivia, ocupando un área total de 61 102 km², de los cuales 48 775 km² se encuentran en territorio peruano, incluyendo la porción correspondiente al lago. Esta cuenca en territorio peruano se ubica aproximadamente entre los 15°07' y 16°15' de latitud sur y 68°35' y 70°08' de longitud oeste. (Fuente: Atlas hidrológico 1976 del SENAMHI). Y en territorio boliviano llega hasta los 17°20' de latitud sur y 71°10' de longitud oeste.

Geográficamente, limita por el norte, con las cuencas de los Urubamba, Alto Ucayali e Inambari, al noreste, con las cuencas de los ríos Camana – Majes y Tambo, al oeste con las cuencas de los ríos Locumba, Sama y Caplina y, al sur con la República de Bolivia.

La Región Hidrográfica del Titicaca está conformada por los ríos con cuyo origen se encuentra en las cumbres andinas, y que vierten sus aguas en el Lago Titicaca. Esta región Hidrográfica se encuentra ubicada en la Meseta del Collao, limitada por la Cadenas Oriental y Occidental de los Andes del Sur y el Nudo de Vilcanota. Los ríos forman extensos valles en las proximidades de su desembocadura, cuyas áreas bajas son inundables durante la época de creciente, afectando el cultivo. Asimismo estos valles son los principales centros agrícolas de la región, destacando el cultivo de la papa, el trigo, la quinua y la cebada. A orillas de estos ríos se encuentran las principales ciudades y centros poblados como Juliaca, Lampa, Azángaro, Ayaviri, Pucará, entre otras. De otro lado las cuencas de los ríos de esta Hoya Hidrográfica representan el mayor centro ganadero del Perú, en la crianza de alpacas, ovinos, llamas y vacunos.

Los ríos de la Hoya del Titicaca tienen sus origen en las Cadenas Occidental, en la Cordillera Volcánica y Oriental, en la Cordillera de Carabaya, y la Cordillera de Vilcanota o Nudo de Vilcanota, en los Andes del Sur, son de corta longitud y poco torrentosos, al discurrir sobre la Meseta del Collao son de suave declive, por lo que son poco torrentosos. El caudal de estos ríos caudal variable a lo largo del año. Su caudal se ve incrementado durante el período de lluvias, entre los meses de Diciembre a Marzo, provocando en algunos casos la inundación de extensas áreas próximas al Lago. Luego su caudal disminuye durante los meses de Junio a Noviembre.

En los ríos de esta Hoya Hidrográfica existe una gran fauna de peces de menudos tamaños conocidos en la región con el nombre de chalhua. Asimismo en el río Suches, abunda otra especie de pez llamado Suche.

La zona de estudio se muestra en el Mapa Ubi, con su geografía abrupta con rangos altitudinales que oscilan desde los 3 600 msnm a 5 600 msnm. Dentro de esta región se encuentra el lago Titicaca, que por sus características físico natural, el lago Titicaca constituye el elemento de mayor importancia del sistema hídrico.

El lago tiene un largo de 176 km y 50 km de ancho, su área es de 8 300 km² de los cuales 4 996 km² corresponden al Perú y 3 304 km² a Bolivia. El lago en conjunto consiste de tres partes importantes: El lago grande, la bahía de Puno y el lago pequeño hacia el sureste de Yunguyo. El lago Titicaca es una gran masa de agua, que ocupa una depresión en el extremo norte de la meseta del Collao, es el lago navegable más alto del mundo y el volumen de agua promedio es de 932, 000 MMC, de los que aproximadamente el 3% se renueva cada año.

La vertiente tiene forma elipsoidal, en la parte peruana posee dos zonas importantes, la de nacientes (tributarios), con aporte medio anual de 150,0 m³/s y la zona del lago con una lluvia media anual de 710 mm/año.

El relieve de las cuencas, es variable pudiendo establecerse dos zonas: una alta, en la cual la hoya hidrográfica escarpada, de fondo profundo y quebrado con pendiente relativamente fuerte, y otra baja en la cual la hoya es plana poco escarpada alargada y de desnivel gradual, pero de cauce ancho y profundo. El discurrir de la mayoría de los ríos es muy sinuoso en su parte alta y radial en la parte baja.

La precipitación es una de las variables más importantes que influyen en la producción agrícola, debido a que la precipitación pluvial, es normalmente la única fuente de humedad que se le proporciona al suelo. La distribución espacial de la precipitación media anual tiene un patrón decreciente de norte a sur. En general, varía de 200 a 1400 mm. por año, con máximos valores (entre 800 y 1400 mm.) sobre el lago Titicaca, debido a la influencia propia de la gran masa de agua lacustre sobre la humedad atmosférica. Por fuera de la zona lacustre, la zona más lluviosa se encuentra en el extremo norte de la región (cabeceras de los ríos Ramis y Coata), donde alcanzan valores entre 800 y 1000 mm luego se produce un decrecimiento paulatino de la lluvia en la región del altiplano hasta alcanzar 400 mm en el sector del Maure, aproximadamente hacia la mitad de la región. Al sur del río Maure la precipitación sigue decreciendo hasta alcanzar la cifra de 200 mm. en el extremo sur occidental (salar de Coipasa). En los bordes longitudinales del altiplano la precipitación muestra una tendencia a aumentar, debido a la influencia de las cordilleras oriental y occidental (lluvias orográficas). Esta influencia es más marcada en la cordillera oriental debido a la influencia de los vientos húmedos procedentes de la Amazonía. Conviene anotar que esta cordillera constituye una barrera a los vientos amazónicos, los cuales descargan la mayor parte de su humedad en la vertiente oriental de la cordillera, produciendo un efecto de abrigo en el sector del altiplano.

Por lo tanto, el régimen anual de las lluvias en la vertiente es variable debido a factores como su latitud geográfica (al norte con precipitación totales moderadas, disminuyendo hacia el Sur con características de clima semidesértico y desértico). A su longitud (las condiciones orográficas condicionan de manera diferente, al Este la cordillera oriental tiene un efecto barrera, en cambio al Oeste, la cordillera occidental causa un aumento de la precipitación puesto que produce la descarga del resto de la humedad que pasa a la barrera oriental, más la humedad generada por el lago Titicaca).

A) Suelos

CORPUNO y ONERN (1965) elaboró el estudio agrologico que ha permitido la clasificación taxonómica y la delimitación cartográfica de suelos de la cuenca del río Ramis. De acuerdo a las formaciones edáficas pueden clasificarse bajo el esquema siguiente:

1. Suelos Lacustres o Aluvio Locales de Áreas Depresionadas.
2. Suelos Lacustres y Aluvio Locales de la Altiplanicie
3. Suelos Aluviales y Aluvio Locales propios de la Altiplanicie y Quebradas.
4. Suelos Aluvio Locales y Glacio Fluviales
5. Suelos residuales o insitu en ladera y clima de cerros.

a.1 Suelos lacustres o aluvio locales de áreas depresionadas: los suelos de este grupo se han formado a partir de materiales acarreados de lugares cercanos dentro del lago que antiguamente ocupaba la zona. Se caracterizan por estar constituidos por sedimentos finos, permanentemente con exceso de humedad o con alto acumulamiento de sales solubles. Este grupo esta representado por la Asociación Limnos y por la Asociación Muni.

a.2 Suelos lacustres y aluvio locales de la altiplanicie: estos suelos se han formado a partir de sedimentos relativamente finos y profundos de origen lacustre y aluvio locales. Ocupan la mayor parte del Altiplano central. De acuerdo a sus condiciones de drenaje, estos suelos se subdividen en: (1) tierras de drenaje normal y (2) tierras con características de drenaje imperfecto.

En este primer subgrupo, se encuentran la Asociaciones Pucara, Chuquibambilla, Pacobamba, Chocorossi y Suñate. Todos estos suelos, a excepción de Choccorossi, que son Intrazonales, conforman los exponentes zonales típicos de la zona evaluada.

En el segundo subgrupo, se encuentran las Asociaciones Titicaca, Sorani, Umachiri, Pupuja, Parpuma y Cala-Cala todas las cuales son Intrazonales, dominadas en mayor o menor grado por la acción del factor hidromorfo.

Generalmente, ambos subgrupos se encuentran cubiertos por pastos naturales y cuando son cultivados, se conducen ciertos cultivos de altura como la papa amarga, papa dulce, cebada, quinua, avena forrajera y otros.

a.3 Suelos aluviales y aluvio locales propios de la altiplanicie y quebradas: los suelos de este grupo se han originado a partir de sedimentos aluviónicos de textura y espesores variados, depositados por la acción de las aguas de los ríos Ayaviri, Azángaro y Ramis, así como por los numerosos afluentes de estos.

En este grupo, se encuentran las Asociaciones Calapuja y Achaya, cuyos suelos zonales, de evolución mucho más joven que el grupo anterior.

Generalmente estas tierras se encuentran cubiertas también por pastos naturales permanentes.

a.4 Suelos Aluvio Locales y Glacio Fluviales: estos suelos se han derivado de materiales marcadamente gruesos, acarreados por la acción de los ríos Corahuina y Nuñoa.

Este grupo incluye solamente a la Asociación Nuñoa, son suelos delgados, bastante planos, con alto acumulación de grava y piedras. Casi en su mayor parte, estos suelos se encuentran bajo una vegetación permanente de pastos nativos.

a.5 Suelos residuales o insitu en ladera y clima de cerros: este grupo de suelos primarios o de formación de insitu (originados en el lugar) se ha originado a partir de materiales sedimentarios (calizas, lutitas y areniscas, principalmente) y de origen volcánicos.

Dentro de este grupo, se han delimitado las Asociaciones Pusi, Ayabacas, Jacco y Sara. Estos son suelos superficiales, de fuertes pendientes, de alta susceptibilidad a la erosión pluvial y de baja capacidad productiva. Su aptitud agropecuaria es muy limitada.

B) Geología

La región del altiplano "Sistema TDPS" ha sufrido una evolución estructural que llega hasta tiempos muy recientes, con fenómenos y vulcanismo muy activas. Durante el cuaternario, la evolución del altiplano ha estado ligada fundamentalmente a los cambios de clima. La alternancia de los períodos húmedos y secos, cálidos y glaciares ha determinado en el altiplano el desarrollo de lagos sucesivamente de más amplios a más reducidos que los actuales. A estas situaciones hidrológicas corresponden diferentes depósitos que van desde morrenas glaciares en las cordilleras, a sedimentos fluviales entre el pie de monte y la planicie, y a formaciones lacustres y evaporíticas en la parte central de la llanura.

Según Servant, Fontes y Berggren, citados en el Plan Director Binacional, denotan que, durante Pleistoceno Superior se sucedieron varias fases glaciares que determinaron una progresiva reducción de la superficie lacustre, que al comienzo del Pleistoceno se nivelaba alrededor de 200 m por encima de su nivel actual, con un área de más de 50, 00 Km² contra los aproximadamente 8400 actuales. Los lagos más antiguos del Cuaternario (Mataro y Cabana) ocupaban todo el altiplano, el cual ya conformaba una cuenca endorreica. Los posteriores lagos Ballivian, al norte y Escara, al sur, estuvieron separados por el paso de Ulloma-Callapa. Sin embargo, en la época del lago Minchin toda el área comenzó a tributar hacia los salares de Coipasa y de las otras depresiones meridionales. Durante el descenso del nivel del lago Tauca, el paso de Ulloma pudo haber retornado su función de divisoria, pero pudo haberse reabierto durante un posterior ascenso del nivel del Titicaca, quizá gracias a la acción del río Mauri, cuando se generó la divisoria del Aguallamaya.

En algunos períodos del Pleistoceno, el lago Titicaca alcanzó niveles bastante más bajos que los actuales, de manera especial durante las glaciaciones (algunos autores hablan hasta de 60 m). en el Holoceno, las investigaciones arqueológicas y los datos de espesor de aluviones muestran que el nivel del lago alcanzó fluctuaciones cercanas a los 30 m. hace 500 años el nivel del lago era mayor que el actual en unos pocos metros. Durante los períodos de descenso el clima era seco y el Desaguadero no llevaba agua fuera de la cuenca del Titicaca.

La divisoria con las cuencas del sur se encontraba en la zona de Aguallamaya. Los ríos que tributaban al Titicaca presentaban lechos erosionados y formaban canales que penetraban en el lago actual varias centenas de metros. Evidencias de tales canales se encuentran en el fondo del lago, a profundidades de 10 y 20 m frente a las desembocaduras actuales (en el lado peruano se ha encontrado una formación arcillosa lacustre con paleocauces colmatados a 30 m de profundidad con respecto al nivel actual, debajo de un relleno de limos, arenas y gravas). Evidentemente, durante los períodos de bajos niveles, el río Desaguadero vertía al lago mismo, al igual que los flujos de todas las napas localizadas aguas arriba del Aguallamaya. Al Sur de esta divisoria, los flujos se dirigían hacia el Desaguadero y los lagos del Sur. La erosión natural no ha podido rebajar totalmente el fondo del río en el sector del Aguallamaya, por lo que en este tramo se forme continuamente en el lecho del río una barrera de lodo y arena, justo en el tramo donde se encuentra el cambio de pendiente que coincide con la antigua divisoria.

La geología juega un papel muy importante en la definición de unidades temáticas del ecosistema altiplánico, para lo cual se debe tener en cuenta muchos aspectos entre los cuales se tiene: la geomorfología, la geología estructural, la petrología, la tectónica, la sedimentología, la estratigrafía, geotécnica, entre otras.

B.1 Geología Histórica y Evolución Tectónica de la Cuenca del Titicaca: el relieve de la cuenca es fruto de sucesivos eventos tectónicos y diversas fases de sedimentación, deformación, levantamientos, transgresiones marinas, eventos volcánicos, por último la erosión y peneplanización de la gran cuenca Peruana - Boliviana.

Seguidamente se describe la evolución:

➤ **Proterozoico**

Precámbrico: Los ciclos orogénicos en esta era son poco conocidos, debido a que las rocas han sufrido un fuerte metamorfismo por tanto estas no conservan textura ni fosilización para poder definir el tipo de vida (fauna, flora) y clima de esta era. Posiblemente haya cuatro eventos tectónicos a nivel de Sudamérica y que afectaron a la cuenca siendo distensivos.

Paleozoico: La sedimentación en la cuenca, se caracteriza por ser netamente continental, ya que no existe evidencia de transgresión marina, siendo la cuenca, parte del escudo Brasileño, este escudo tenía aproximadamente 200 a 400 kilómetros de longitud, llamado Ramal Argentino Boliviano de rumbo NS y cambiando al noreste a partir de 18 grados latitud sur, formando así la deflexión de Santa Cruz abarcando la parte sur este del territorio peruano.

Ordovícico: Después de sufrir una tectónica distensiva en el continente sudamericano se formó una gran cuenca abarcando los países de Perú, Chile y Bolivia esto en el ordovícico inferior, siendo la parte más profunda, la zona noroeste de la cuenca del Titicaca, sedimentándose así, rocas de tipo pelitas y arenitas (formación Sandia y Calapuja), la parte sudeste de la cuenca, la formación Cancañiri y Tokochi típicamente continuando así la depositación hasta el ordovícico medio, alcanzando hasta 700 metros de potencia según Laubacher. En el ordovícico superior, ocurre un levantamiento progresivo continental, retirándose las aguas por el sur de la cuenca del Titicaca y teniendo sedimentos típicos arenáceos de la formación Amurata y Anzaldo, para luego afines del ordovícico no haya sedimentación.

Silúrico: Luego de la salida del mar al término del ordovícico, se produce una nueva regresión del mar pero abarcando menor superficie que en el ordovícico, la gran cuenca silúrica recibe aportes de sedimentos de la cordillera de la costa y sedimentos finos del escudo Brasileño, ya que este último, no presentaba altas pendientes, llamándolo Caffro Malvino (de aguas frías), continua siendo profunda la parte noroeste de la cuenca del Titicaca sedimentando así, la formación Ananea y la formación Uncía, hacia la parte superior del silúrico para luego sedimentar a las formaciones Chagrapi, Catavi y Llallagui con un contenido más preponderante de arena arcilloso.

Devónico: La parte de la cuenca del Titicaca, se encontraba sumergido bajo aguas marinas muy profundas, especialmente la parte oriental de la cuenca, por eso la sedimentación silicio clástico hacia la parte este. A fines del devónico medio, los mares empiezan a retirarse del gran geosinclinal por el levantamiento paulatino de la cuenca.

Este periodo se caracteriza, por una tectónica de compresión que da lugar a plegamientos y metamorfismos de tectónica Herciniana, se da también un vulcanismo sin sedimentación.

Carbonífero: Ocurre una emersión total de las cuencas y un profundo cambio en la paleogeografía, formándose otras cordilleras ocasionadas por la tectónica distensiva, formando así, grandes fallamientos para luego ser rellenados por depositación fluvial, glacial y deltaica con evidencias de actividad volcánica, quedando así la parte noreste de la cuenca en una transgresión y regresión en el Mississipiano.

El Pensylvaniano, el vulcanismo es más intenso y la parte sur oeste de la cuenca del Titicaca peruano que queda emergida y el norte de Bolivia queda someramente sumergida, son sedimentos arenaceos.

Pérmico: La cuenca marina del pérmico, ocupa los territorios de Perú, Bolivia, Ecuador y Brasil y en este periodo las secuencias depositacionales son carbonáticas (Grupo Copacabana y Formación Chutani), también se observa una quietud tectónica, logrando así una peneplanización a lo largo de este período y posiblemente de la cuenca del Titicaca.

También se produce de forma paulatina un levantamiento y dejando sobre las rocas carbonatadas sedimentos de origen continental (grupo Mitu), para luego plegarse por la fase compresiva de la tectónica tadiherciniana, esto en el norte de la cuenca del Titicaca.

Una vez emergidos las cuencas de sedimentación, se produjo una intensa erosión por agentes Fluviales y depositándose en las grandes fracturas ocasionadas por la fase distensiva de la tectónica Finiherciniana.

Mesozoico: Se distingue claramente parte del desarrollo del Ciclo Andino en sus dos facies marinas, vulcano sedimentario y hasta continental, esto por la formación del geosinclinal, ampliándose por una tectónica de distensión a principios del Mesozoico, la culminación de cada fase es marcada por la deformación orogénica.

Triásico: Continúa la erosión de las partes continentales, con secuencias de sedimentación y vulcanismo, ya que parte del territorio boliviano se encontraba bajo aguas someras, estas sufrieron posiblemente una evaporación, quedando así, sulfatos (evaporitas, yesos) de las Formaciones Tiquina, Campana y Chuquichambi. Parte del jurásico medio y superior en el territorio peruano no hubo sedimentación, porque, este estuvo emergida hasta el Jurásico inferior.

Jurásico: Ocurre una regresión marina a finales del jurásico inferior, para luego, el mar retirarse lentamente, dejando como evidencia calizas, yesos y areniscas del Grupo Yura, que son sedimentos de fase marina somera, oscilante y en la parte superior de tipo volcánicos. En el jurásico superior ocurre una transgresión fuerte, debido a una epirogénesis depositándose así clásticos continentales de la formación Chupa y la parte superior de la formación Ravelo.

Cretáceo: La sedimentación de la gran cuenca jurásico - cretáceo en la que fue parte la cuenca del Titicaca, eran similar a la del jurásico superior, en el cual, la gran cuenca de Putina inicia su relleno de sedimentos de forma paulatina, debido a, movimientos de subsidencia, quedando la parte de la cuenca en un ambiente semicontinental, teniendo aportes arenáceos de las zonas positivas o emergidas de la cordillera oriental, esto continua, hasta el término del período cretácico pero, con fuerte actividad volcánica en la parte sur oeste de la cuenca del Titicaca.

En la cuenca del lago Titicaca, el cretáceo inferior es representado por las formaciones Sipin, Muni, Huancané, Condo, Cosmina y Tarapaya, compuestas por areniscas cuarzosas a feldespáticas, calizas, lutitas. En el cretáceo medio, la cuenca continua una depositación calcárea, sobreponiéndose a las areniscas del cretáceo inferior e intercalándose con lutitas del grupo Moho, esta secuencia calcárea son de las formaciones Miraflores y Ayabacas. En la parte superior del cretácico, la cuenca del Titicaca, comprende facies mixtas de la Formación Cotacucho, Vilquechico pero la litología de las formaciones bolivianas nos dan a entender la presencia de facies continentales deltaícas y facies marinas abisales por la presencia de carbonatos e intercalaciones de lutitas negras para luego activar la orogenia Andina (Fase Peruana) iniciándose el levantamiento de los Andes, por eso la presencia de tufos en la parte inferior del grupo Puno.

➤ **Cenozoico**

Terciario: Comprende secuencias y sedimentos continentales, volcánico sedimentarias, representado por el grupo Puno o también llamado capas rojas formando por una potente capa de conglomerados feldespáticos que fueron afectados levemente por la fase Inca del Ciclo Andino, para luego, iniciar una actividad volcánica intensa en gran parte del noroeste del sistema TDPS, estos derrames volcánicos, luego son afectados por fase Quechua de tipo compresivo (terciario superior), luego ocurre una peneplanización con una fuerte erosión.

Cuaternario: Continua el levantamiento progresivo de los andes, acompañado por actividad volcánica andesítica, se sigue profundizando los valles y depositándose sedimentos glaciarios del Pleistoceno seguido de abundantes explosiones volcánicas para que en el Holoceno quede la fisonomía actual de la cuenca del Titicaca Perú - Boliviana.

Estratigrafía: La estratigrafía de la cuenca del Titicaca, presenta una secuencia de afloramientos rocosos que van desde la era Proterozoica, período Pre-Cámbrico Superior hasta la sedimentación actual. Esta depositación actualmente ha sufrido cambios mineralógicos, texturales y estructurales según el tiempo y el tipo tectónismo que se dieron sobre estas rocas.

Una gran extensión de los afloramientos en la cuenca, son de tipo sedimentario (areniscas, calizas y lutitas), Volcánicos (andesitas, tufos y edificios volcánicos), metamórfico (pizarras, cuarcitas) e intrusivos (graníticos, porfidos, dacíticos, monzogranitos, tonalitas, granodioritas y estructuras plutónicas) esto según el orden de aparición en el sistema TDPS.

Proterozoico: La exposición de rocas metamórficas (Gneisses fracturados) del pre-cámbrico inferior a medio, se encuentran en el lado Boliviano (hoja :Corque y Payachata) cerro Uyarani. Esta litología aún no se conoce para la parte de la cuenca Peruana.

➤ **Paleozoico**

Cámbrico: Conformado mayormente por cuarcitas, pizarras, filitas y arcosas con intercalaciones de coladas de lava, estructuras almohadilladas basálticas, sills y diques doleríticos estos del Complejo Chila. Estos afloramientos rocosos, son del período pre-cámbrico superior hasta el cámbrico medio, se ubican en la comunidad de Andamarca, departamento de la Paz, al noreste del poblado de Jesus de Machaca. En la parte de la cuenca del Titicaca del lado Peruano no se conoce aún afloramientos de este tipo.

Ordovícico: Los afloramientos de este período en el sistema TDPS, se presentan litológicamente tanto en el sur del Perú y noroeste de Bolivia por las formaciones Calapuja, Sandia, Cancañiri, Anzaldo, Amurata, Tokochi, Capinota, San Benito, Coroico y Licoma. La litología predominante de este período, son las areniscas cuarcíticas, limolitas, pizarras negras con intercalaciones de cuarcitas, lutitas y esquistos. Los aportes de sedimentos hacia la cuenca ordovícica son del Maciso de Arequipa y parte del Escudo Brasileiro.

Silúrico: La cuenca siluriana, se forma por la transgresión Malvino Caffre y se representa típicamente por las formaciones Ananea, Uncia que son de ambientes marinos profundos y haciéndose más arenaceos hacia el devónico con la formación Catavi. El silúrico está constituido por Pizarras, cuarcitas, areniscas con intercalaciones de lutitas. Las dos facies del silurico arcillo arenosa y arenosa (silurico superior a devonico inferior) dan lugar a la formación Chagrapi y Llallagua. La secuencia lutacea se hace más hacia el noreste por la transgresión ocurrida.

Devónico: Continúa la sedimentación similar a la del silúrico hasta el devónico medio, siendo lutitas en la parte inferior y haciéndose más arenáceas a cuarcíticas, en la parte superior, presenta una fauna de trilobites, conularias y braquiópodos del Grupo Cabanillas; formaciones Chagrapi, Icla, Vila vila y Collpacucho esto, en la parte inferior del devónico, en la parte media del devónico, se ubican las formaciones, Belen, Santa Rosa y Sica Sica. En la parte superior, se ubican las formaciones Lampa y Huamanpampa, la litología dominante del devónico son areniscas cuarcíferas con intercalaciones de lutitas, lutitas negras, limolitas micáceas, fangolitas, y cuarcitas gris verdosas.

Carbonífero: En el mississipiano, típicamente se representa por el grupo Ambo en el Perú y por las formaciones Cumana, Yaurichambi, Siripaca, Khasa, esto, en Bolivia. El carbonífero inferior recibe aportes de tipo glaciario, típico de la formación Cumana, indicando el levantamiento de la cordillera para luego esta cuenca estrecha ser emergida, en general la litología del Mississipiano comprende conglomerados, areniscas, cuarcitas, depositación glaciaria, lutitas negras y carbón impuro.

El pensylvaniano se observa una transgresión marina, trayendo sedimentación clástica carbonatada, en el lado peruano se denomina como grupo Tarma. La parte sur este y nor este de cuenca queda en un ambiente litoral a continental (Bolivia) con sedimentación arenácea.

Pérmico: Se hace más fuerte la transgresión marina del Pensylvaniano en el pérmico inferior, dejando secuencias de calizas y lutitas en porcentaje mínimo del grupo Copacabana en el Perú y formación Copacabana en Bolivia, indicando depósitos marinos profundos, esta depositación continúa hasta el pérmico superior.

En el pérmico superior, la secuencia depositacional se hace más continental, quedando parte de la cuenca en un ambiente transicional, siendo denominado como grupo Mitu, comprende conglomerados, areniscas arcólicas, limolitas, Lutitas y comienzos de actividad volcánica en su parte superior.

➤ **Mesozoico**

Triásico: Continúa el vulcanismo del pérmico superior, hasta el triásico medio, dando forma al Grupo Iscay que contiene litológicamente depósitos volcánicos, coladas de lava, ignimbritas, brechas y sineritas, es posible relacionarlo con la formación Tiquina en su parte superior. La sedimentación empieza en el triásico superior, es de ambiente marino en el sistema TDPS no es muy diferenciado.

Jurásico: Se caracteriza por el inicio de una secuencia de calcáreos del grupo Lagunillas a finales del jurásico medio, haciéndose hacia el jurásico superior más pelítico, pasmítico hasta arenáceo, esta depositación, es de ambiente marino profundo a litoral. Junto con el levantamiento de la cordillera, a finales del

jurásico, se produce un vulcanismo en la cordillera occidental dando forma al grupo Yura, formación Puca Puca y correlacionado geocronológicamente con la formación Ravelo en Bolivia, esta formación tiende a ser de ambiente continental a litoral, conteniendo más sedimentos clásticos a arenáceos con estratificación cruzada indicando pequeñas transgresiones y regresiones en lado boliviano, quedando finalmente emergido la parte sur y noreste del sistema TDPS.

Cretáceo: A finales del Jurásico e inicios del cretácico, se depositan las formaciones Chupa y Tirapaya, esta secuencia estratigráfica comprende conglomerados, cuarcitas mal clasificadas, calizas arenosas. La parte inferior del cretácico, presenta litológicamente areniscas cuarcíticas, lutitas con intercalaciones de calizas, margas, areniscas cuarzosas feldespáticas a pardo rojizas con estratificación cruzada típicos sedimentos de ambiente transicional a epicontinental de las formaciones Sipin, Angostura, Muni, Huancané, Cosmina y Condo.

En el cretáceo medio, se produjo una transgresión marina sobre la cordillera occidental, quedando la cordillera oriental como una zona positiva, aportando sedimentos y en el cual la cuenca queda en parte bajo mar y parte como ambiente semicontinental donde se depositan calcáreos de la formaciones Ayabacas y Miraflores, estos se superponen a las areniscas del cretáceo inferior. Estas calizas quedan fuertemente plegadas y causando niveles limolíticos intercalados.

El Cretáceo superior, se caracteriza por la emersión lenta de la cuenca, dando lugar a los cambios de facies carbonáticas a clásticos continentales de color rojo, este cambio de facies se representa por las formaciones El molino, Pahua, Chaunaca, Aroifilla, Toro Toro, Mulasi (secuencia carbonática), Cotacucho, Angostura, Vilquechico, Muñani (secuencia arenosa a pelítica)

➤ **Cenozoico**

Terciario: Comprende secuencias vulcano - sedimentaria, representa gran parte del terciario, el grupo Puno, consta litológicamente de areniscas feldespáticas, conglomerados, limolitas, calizas, horizontes de tufos y lutitas yesíferas. La secuencia inferior del Grupo Puno se correlaciona con las formaciones Bolivar, Parotani, Lurivay, Salla, Coñiri y Aranjuez; consta litológicamente con conglomerados con intercalaciones de tobas.

La parte media del grupo Puno, comprende secuencias intercaladas de areniscas con conglomerados típicos, las formaciones Berenguela, Aranjuez, Huyllamarca, Huayllapucara, Tiahunacu, Pando.

La parte superior del grupo Puno, son secuencias arenáceas y con lentes laminares de Yeso y se correlacionan con las formaciones Ballivian, Santa Lucia, Tusque, Chuquichambi, Turco Potoco y Jalluma.

Luego sucede una gran actividad volcánica correspondiente al cuaternario inferior del grupo Tacaza con niveles sedimentarios de arenisca, formaciones

Peñas, Abaroa, Tahua, Murmutani, Calcalaguaya, Igmimbritas; Volcánicos Ojje, Cohoni, Chua y que se ponen en discordancia con el grupo Puno y las formaciones que ocupan el Paleógeno a Neógeno inferior boliviano. Sobre los derrames andesíticos de esta actividad volcánica, se sobreponen otras secuencias piroclásticas tufosas pertenecientes al grupo Maure y la formación Mauri (Bolivia) de facie lacustrina.

Cuaternario: Luego de la transición sedimento volcánica, a inicios de este período caracterizado por el grupo Tacaza cuya litología predominante es en su parte inferior bloques de tobas en matriz arenácea, lavas con flujos de brechas, ignimbritas y rocas sedimentarias en su parte superior, cuya correlación se mencionó anteriormente.

Luego de la actividad Volcánica Tacaza se sobreponen otro evento con litología que comprenden lavas dacíticas, ignimbritas intercaladas con sedimentos arenosos y conglomerados en la base, pertenecientes al grupo Sillapaca, Palca; con las formaciones Quenamari, Caquiaviri, Kollpana, Pomata, Crucero, Topohoco, Taraco(B) Pulltuma; volcanitas Morococala, Copacabana, Huayricunca y Rosa Pata. Luego de esta secuencia volcánica se depositan las formaciones Rosa Pata, Capillune, Arco Aja Umala, La Paz, Cachilaya y SamanCHA.

En los pisos Plio - Pleistocénicos, los volcánicos Sencca y las formaciones Remedios, Ulloma, Taraco(P) y Azángaro se forman conteniendo gravas, arenas, limos, depósitos lacustrinos y con lechos de calcáreos, haciéndose al final de esta secuencia depositacional, la presencia de actividad volcánica, con la formación Taraco e iniciándose la última fuerte actividad volcánica que se dio a nivel del TDPS, llamándolo en el Perú grupo Barroso y su correlación son los Domos Livichuco, Formación Sacaba y luego coladas de lava traquiandesítica a dacítica.

Para luego en la parte superior de esta secuencia depositacional se formen las calizas Michin, Formación Charaña y en la parte inferior la Formación Yauri. Estas dieron forma a la fisiografía actual de la cuenca del Titicaca, depositándose actualmente arenas, terrazas lacustres, bloques, limo, arcilla, depósitos fluvioglaciales y cantos.

C) Geomorfología

En el área de estudio, se han podido observar contrastes tanto a nivel de latitud como de longitud el cambio y la predominancia de unidades geológicas que se dan de oeste a este, la cordillera occidental presenta predominantemente montañas volcánicas y la cordillera oriental montañas sedimentarias, la evolución lacustre, a formado, grandes llanuras así como terrazas entre estas dos montañas. Los cambios climáticos han contribuido al modelamiento, la evolución de los glaciares en las zonas volcánicas es patético al observar grandes morrenas que han formado valles en "U" con inmensos bofedales, la

cobertura vegetal de la misma manera, se hace menos densa de norte sur, apareciendo las cactáceas más hacia el sur-oeste, indicando una disminución de los niveles de precipitación.

Descripción de Unidades Geomorfológicas

1. Fondos de Valle: Son rasgos de relieve de conformación geológica moderna (cuaternario), básicamente, correspondientes a formas de acumulación y erosión de topografía plana a ligeramente inclinada no disturbada, y comprende tanto a los de tipo aluvial o fluvial como todos los de tipo glacial y fluvioglacial.

➤ Fondos de Valle Aluvial (a): han sido modelados por corrientes fluviales, constituyéndose en las formaciones más recientes. Configuran superficies estrechas o fajas adyacentes al curso de los ríos compuestas por materiales aluviales diversos, producto de la denudación, acarreo y deposición de las superficies rocosas, normalmente en forma de terrazas, según las condiciones imperantes, por las que cada nivel de acumulación corresponde a un periodo de mayor erosión (rextacia) seguido de uno más húmedo y estable (biostacia).

➤ Fondos de Valle y Explanadas Glaciales: son geoformas desarrolladas en las incisiones formadas por el levantamiento y plegamiento andino, donde el proceso de descenso de los hielos han modelado y dado forma a los valles. Ocupan las zonas montañosas arriba de 4200 m. de altitud, siendo además de menor extensión que los fondos de valle aluviales. Estos son:

Depósitos Fluviales (As)

Depósitos Aluviales Coluviales (a)

Depósitos Coluvio Fluviales (Fa)

Depósitos Fluvioglaciales (Ga)

Bofedales (B)

➤ Depósitos de Piedemonte

Depósitos Fluvioglaciales (gl)

Depósitos Aluviales, Coluviales (ac)

Acumulaciones Detríticas (Ad)

2. Altiplanicies: esta unidad comprende las superficies planas o relativamente planas por encima de los 3800 msnm. Dentro de esta unidad se tiene la llanura lacustre correspondiente a una superficie de conmutación la cual se encuentra en la zona circunlacustre y en la superficie de erosión puna con los procesos de peneplanización.

➤ Superficie de Colmatación Lacustre (Llanura Lacustre): Son las zonas adyacentes al Lago Titicaca, presentan superficies de deposición uniforme y

no reflejan eventos climáticos diferenciados, su superficie refleja rastros de áreas inundables en épocas de lluvia, debido a los restos de sal en diferentes áreas de la unidad, dejadas por las lagunas temporales.

Llanura Fluviolacustre (LLf)

Llanura Lacustre (Lla)

Llanura Lacustre Inundable (Lli)

- Superficie de Colmatación Lacustre (Terraza Fluviolacustre): zonas que presentan procesos climáticos marcados y muestran la evolución lacustre en fases anteriores a la actual.

Terraza Lacustre Disectada (TT)

Terraza Lacustre con Superficie Conservada Plana, Poco Cortada (TP)

Terraza Lacustre con Superficie Conservada Ondulada y con Numerosas

Pequeñas Depresiones Poco Cortada (To)

Terraza Lacustre con Superficie Degradada Completamente Obliterada y Afloramientos del Substrato Sedimentario Terciario, Disectado y Fuertemente Cortado, que Forman Paisajes de Colinas (Ts)

- Depresiones Lacustres

Planicie Salar (Sp)

Laguna Salar (Sl)

- Superficie de Erosión Puna Conservada Originadas por el Intenso Período de

Erosión Miocénico con Procesos de Peneplanización Mayormente en alturas de 4200 a 4600 m de altitud mayormente planas a ligeramente onduladas e inclinadas presentan a veces mal drenaje. (Pn).

Corresponde a una unidad morfológica mayor de carácter regional, relativamente plana, tipo planicie o penillanura de alta montaña originada por la denudación o aplanamiento generalizado, su conservación se debe a la mejor resistencia, uniformidad y horizontalidad de sus componentes rocosos a la erosión, aparte que en muchos casos presentan acumulaciones glaciares que nivelan las irregularidades topográficas.

- Superficie de Erosión Puna Disectadas Similares y Asociadas a las anteriores pero con mayor disección y ondulado e inclinación. Ocasionalmente con afloramientos rocosos (Pn).

Al igual que en el anterior caso, estas superficies no son sino remanentes mas disectados o de mayor ondulado e irregularidad de la antigua unidad de mayor aplanamiento o erosión puna, consiguientemente son similares a las anteriores, sobre todo lo que toca a su génesis y evolución diferenciándose, por su mayor irregularidad topográfica, y relativamente mayor inclinación.

3. Superficies Colinosas: están representados por las siguientes unidades:

- Colinas Volcánicas de formas redondeadas y pendientes medias, cobertura coluvial, localmente espesa y fuertemente cortada (Cv).
- Colinas de substrato sedimentario estructurado de formas redondeadas y pendientes medias, cobertura coluvial localmente espesa y fuertemente Cortada (Cs).
- Colinas volcánicas de formas disectadas y fuertemente cortadas, pendientes variables (Cvd).
- Colinas de substrato sedimentario estructurado de formas disectadas y fuertemente cortadas con crestas alargadas y puntiagudas pendientes Variables (Csd).

4. Mesetas Volcánicas: están representados por las siguientes unidades:

- Meseta de lavas e ignimbritas con superficie subhorizontal o ligeramente inclinada y/o ondulada, conservada y poco cortada con un drenaje subparalelo, erosión laminar, lineal moderada concentrada en los canales (mp).
- Meseta volcánica con superficie subhorizontal o ligeramente inclinada, conservada poco cortada (mc).
- Meseta volcánica fuertemente disectada drenaje denso ligeramente inclinada (mm).
- Meseta de lavas e ignimbritas con superficie original reconocible pero degradada y disectada y con afloramiento del substrato sedimentario terciario, disectado y fuertemente cortado (Md).
- Meseta de substrato de lavas e ignimbritas, cubierta por un manto de tobas y
- sedimentos interestratificados superficie irregular, ondulada y cortada por un drenaje de textura fina, erosión moderada a severa laminar y lineal (mt).
- Meseta de lavas e ignimbritas con una superficie fuertemente disectada con
- afloramientos rocosos (mf).

5. Superficies Estructurales: se considera a las formas de relieve de configuración superficial relativamente planas, compuestas de afloramientos rocosos que han conservado su estructura original de depositación horizontal o sub-horizontal, es decir aquellas geoformas cuya conservación y exposición (a la fecha poco disturbada) obedecen a un control estructural litológico, predominantemente plano, mas que a la acción del modelado.

Estas unidades que podrían ser también consideradas dentro de las altiplanicies, asemejan pequeñas mesetas o terrazas estructurales, relativamente altas, que sobre salen al nivel de la planicie, a la que normalmente colindan, a manera de colinas recortadas de cimas planas y bordes mas o menos abruptos, alcanzando cimas entre 4100 y 4400 m.s.n.m.

Su origen, como se mencionó, en muchos casos se relaciona con el desarrollo de formaciones geológicas tabulares, compuestas por derrames volcánicos-clásticos, mayormente de naturaleza tufacea o ignimbrítica de tonos blanquecinos, poco compactos, asociados al vulcanismo plio-pleistocénico.

En general, estas geoformas si bien no presentan deformación tectónica relevante, han sido afectadas por las glaciaciones y la incisión fluvial consecutiva al levantamiento andino, favorecida por la menor competencia de sus componentes rocosos, lo que a traído como resultado que varias de ellas aparezcan recortadas (atravesadas) por los cursos fluviales, con bordes abruptos, hasta derivar en ambientes separados unos de otros, configurando montes, islas planas, de fácil diferenciación.

- Superficie estructural inclinada fuertemente disectada (Volcánica) (Sef): son las geoformas estructurales de topografía superficial ondulada, de origen y ocurrencia igualmente comunes; diferenciándose solamente por su mayor modelado u ondulamiento, por efecto de la mayor disección de su estructura plana original, que en algunos casos han hecho perder su típica planitud superficial, asumiendo formas mas redondeadas, pero siempre manteniendo el esquema de su génesis lito-estructural inicial, es decir, su carácter de geoforma estructural.

Su distribución es mucho más extendida que la anterior encontrándose preferentemente en la parte Noreste; entre los cursos de los ríos grande y Aguas Calientes, donde alcanza el mayor desarrollo, litológicamente corresponden a tufos blanquecinos (Sillapaca); en otras han sido considerablemente erosionados, hasta configurar pequeñas gargantas o "cortes" longitudinales. Otro sector de ocurrencia se da en las inmediaciones de Mazocruz y algo al sur de este poblado; en este caso al parecer corresponden a formaciones geológicas algo más distintas, pero igualmente de tipo Plano- Ondulado estructural, aunque de alturas mas variables.

- Superficie estructural inclinada (Sei): Como parte de estas unidades se ha considerado también, ciertas geoformas estructurales, que si bien no tienen el mismo origen que las anteriores, presentan, ciertas características comunes en cuanto a la configuración de su morfología la cual obedece básicamente al control lito-estructural. A diferencia de las anteriores han sufrido cierta deformación tectónica mayor, manifestada por una ligera inclinación de sus capas, normalmente en una sola dirección (en este caso al noreste) configurando colinas monoclinales.

En el área estas geoformas tienen mínima distribución ocurriendo prácticamente en solo dos exposiciones en el límite norte y al este de Acora en las inmediaciones del lago. En este ultimo caso, corresponden a las

formaciones geológicas sedimentarias del cretáceo superior-terciario inferior (Grupo Puno), expuestas como colinas estructurales suavemente recostadas hacia el noreste.

Superficies colinosas son formas de relieve de diferentes orígenes naturaleza y conformación, caracterizados por su aspecto ondulado de relativa pequeña y mediana altura (sobre nivel de base) que les permite diferenciarse de las unidades planas o altiplanicies y también de las unidades más elevadas (montañas).

Su distribución en el área es amplia conformando una de las unidades de mayor extensión, y considerable irregularidad geomorfológica; encontrándose prácticamente en todos los sectores especialmente entre el límite de la planicie y la porción montañosa; con cotas no mayores de 4200 o 4300 m.s.n.m. y muy ocasionalmente sobre 4500 m.s.n.m. como sucede en la parte Suroeste.

- Superficie estructural disectada e inclinada cubierta por un manto de tobas y sedimentos interestratificados superficie irregular ondulada con afloramiento rocosos. (Sed): corresponden a las superficies onduladas más bajas 80-50m, por lo general son de suave a moderada pendiente y disección; siendo sus características principales comunes a las descritas anteriormente, la ocurrencia de suelos diversos y pasturas normalmente consistentes, así como la presencia de pequeños afloramientos rocosos. Y también, lo relativo al bajo grado de los efectos degradacionales, dependiendo de ello el comportamiento y condiciones de los agentes modeladores y de la naturaleza litológica de sus elementos constituyentes.

Esto ocurre en las inmediaciones de la planicie lacustre, en noreste del área, a manera de pequeñas elevaciones, más o menos aisladas, así mismo en el curso del río Huenque, y otros en menor proporción.

- Superficie estructural inclinada fuertemente alterada (sedimentaria) (ssf): estas superficies por lo común ocurren junto a las anteriores aunque con mayor extensión, abarcando casi todos los sectores del área, con excepción de los ambientes más montañosos (flanco occidental) y de la parte lacustrina del lado Noreste; pudiéndose encontrar, ya sea en alineamiento más o menos aislados como (principalmente) en transiciones hacia las formaciones más elevadas.

Estas vienen a ser las de mayor elevación (hasta 250 m de altura) en este grupo; diferenciándose un tanto por su mayor pendiente, disección y heterogeneidad litológica y morfológica. A veces presenta afloramiento rocosos diversos y casi siempre de mayor desarrollo de procesos erosivos, sobre todo de escurrimiento superficial; es decir de topografía más variada e irregular.

En ciertos casos, dentro de esta unidad se han considerado porciones inferiores de las superficies montañosas, adyacentes a los cursos fluviales,

en las que por lo común, la pendiente es mayor, incluso en formas de pequeños escarpes. Asimismo se incluyen las porciones terminales o estribaciones bajas de montañas que no llegan a configurar geformas montañosas propiamente dichas.

6. Montañas: Constituyen las formas de relieve de mayor elevación e irregularidad morfológica del área; que corresponden al emplazamiento y exposición del macizo occidental Andino en esta parte de la región Altiplánica de Puno.

Su origen común de la mencionada cordillera obedece básicamente al levantamiento Andino occidental, que alcanza su fase final más activa en el terciario superior, cubriendo buena parte del área. Casi simultáneamente, por las fases glaciares, las cuales, conjuntamente con la disección fluvial consecutiva, marcaron el carácter final del modelado de dichas superficies.

Muchas de estas superficies derivan de la destrucción parcial de la antigua superficie puna (emplazada en dicho ambiente montañoso), configurando relieves residuales y estructurales con algunos pilares tectónicos. Por otro lado, se observa diferencias morfológicas según su litología y estructura geológica inicial y condiciones geográficas.

Dependiendo de su ubicación; su litología es variada, con mayor proporción de rocas volcánicas de diversa competencia. Sus pendientes son disimiles y sus altitudes contrastantes, comprendidas entre 4200 y 5000 m.s.n.m.

Constituyen las áreas de mayor afectación a los fenómenos morfodinámicos de altura sobre todo de escurrimiento superficial (erosión) que se incrementa con el aumento de altitud y pendiente; siendo frecuente la acción periglacial en las zonas más elevadas.

En menor proporción ocurren deslizamientos y derrumbes (Casi exclusivo de estos ambientes), y otros como soliflucción pelicular) que erosiona lentamente los suelos.

- Montaña sedimentaria estructurada de formas redondeadas y pendientes de medias a altas, cobertura coluvial abundante. Erosión laminar y lineal moderada severa y en carcavas sobre los mantos coluviales (Rs): son las de menor pendiente (relativa) en el rango moderado (10-20 en promedio, y ocasionalmente 25 grados). Por lo común han sido formadas en rocas más blandas estando o acompañadas por depósitos coluviales, Taludes periglaciares, morrenas solifluidas, mantos de alteración, etc., alternados por algunos afloramientos rocosos, generalmente poco compactos. Asimismo presentan regular desarrollo de suelos y pasturas.

Estas superficies montañosas son de gran extensión en el área, encontrándoseles en casi toda la exposición del macizo andino occidental cuya porción sur (en este caso) ha sido surcada por el río Huenque (Ilave) y

su continuación de los ríos Llusta- Villuta, mas al sur. En menor proporción en la parte Nor Central.

- Superficies Montañosas de Fuerte a muy Fuerte Pendiente: estas superficies son elevadas-montañosas y tienen menor distribución que las anteriores, encontrándose las principalmente en los límites de cuencas, configuran las líneas divisorias de aguas del flanco occidental como también del límite Suroeste donde por otro lado debido al curso de agua que las surca abruptamente, configuran gargantas o pequeños cañones, fuertemente disectados y afectados por procesos erosivos de carcaveo, y otros se diferencian de las anteriores por su mayor pendiente (en el rango de 25-35 grados en promedio y algunos casos de 45 a mas grados) y también por su mayor elevación, alcanzando cimas de hasta 5000 metros de altitud, aveces coronadas por nieves perpetuas, tenemos también las de la cuenca alta del río Coata-Cabanillas. Comúnmente conforman líneas de cumbres elevadas y aristadas, sus suelos son superficiales, con abundancia de afloramientos rocosos, mayormente compactos y a veces expuestos en las vertientes y encajonadas (tipo cañones) configurando escarpes rocosos que ofrecen buena estabilidad.

Por sus fuertes pendientes (tipo escarpes) su disección pronunciada, y su mayor altitud, topografía mas accidentada, estas superficies constituyen las áreas menos favorables para las actividades humanas, deben ser consideradas de protección.

- Montañas volcánicas de formas redondeadas, pendientes de medias a altas presentan uniformidad, cobertura coluvial densa (rv).
- Montaña sedimentaria estructurada de formas irregulares, disectadas y fuertemente cortadas con crestas alargadas y puntiagudas, laderas de cimas escarpadas muy elevadas y glaciadas (rsd).
- Montaña volcánica de formas irregulares disectada y fuertemente cortada laderas de cimas escarpadas muy elevadas y glaciadas (rvd).

7. **Conos y Aparatos Volcánicos:** se han considerado las geoformas de origen volcánico caracterizadas por su configuración peculiar cono-volcánico correspondiente a efusiones centrales o focales; cuya conformación ocurrió conjuntamente con la gran actividad volcánica Plio-Pleistocénica, en este caso de tipo explosivo. Viene a ser parte de la gran cadena volcánica del sur desarrollada entre los límites de Tacna, Puno Moquegua y Arequipa.

Estas geoformas han sido afectadas por los diferentes ciclos erosivos. Su distribución coincide con el sector montañoso del que forma parte, conformando en el mayor de los casos relieves más o menos individualizados y fácilmente diferenciables.

En el área, estas formaciones alcanzan gran desarrollo sobre todo en la parte sur, donde además de configurar conos mas o menos simples de un solo conducto principal, con formas de verdaderos aparatos complejos de un conducto-crater, tipo caldera, siendo sus materiales conformantes muy diversos, mayormente andesíticos traquíticos, correspondientes al grupo Barroso.

Dentro de estas variedades se consideran dos niveles:

- Conos y aparatos volcánicos de primer orden de relativa a menor pendiente (moderada a fuerte) y magnitud por lo general con mayor proporción de materiales (Va): son los conos de menor envergadura, de menor altitud y los de baja pendiente, son bastante diferenciados tienen un solo aparato
- Conos y aparatos volcánicos de segundo orden mucho más empinados de mayor envergadura y disección presentan escarpes y en algunos casos cubiertos de nieve (Vb): Estos son de mayor envergadura en altitud y pendientes, corresponden a aparatos más complejos y de mayor magnitud.

D) Climáticos

En base, al mapa de clasificación climática del Perú elaborado por el SENAMHI (1988) desarrollado según el método de Thornthwaite. La región del Titicaca presenta las siguientes características climáticas (Mapa Cli).

- **Tipo climático Semiseca y semifría [C(o,i) C' H₂]**

La zona comprendida entre los 3 600 hasta 4 200 msnm, se caracteriza por presentar un clima seco, con deficiencia de lluvias en el período mayo – octubre, humedad relativa calificada como seca. Este tipo de clima se localiza muy cerca de zona circunlacustre del lago Titicaca y la laguna Arapa, llegando hasta la parte alta (4 100 msnm) de las cuencas de Ramis y Huancane, en este tipo de clima se encuentran las localidades de Yunguyo, Juli, Chilligua, Puno, Juliaca, Capachica, Arapa, Azangaro, Chuquibambillas, Santa Rosa, Muñani, Putina, Huancane entre otros. La temperatura media durante el día se eleva y generalmente desciende hasta por debajo de cero en las noches, presentando un fenómeno conocido como la “helada”.

El origen de esta variante climática se encuentra en la acción termo reguladora del Lago Titicaca. La temperatura promedio anual varía entre 9.5 y 5.5°C, lo que determina que esta variante climática sea la mas favorable para todas las actividades agrícolas.
- **Tipo climático frigido B(o,i)D' H₃**

Comprende altitudes entre 4 200 y 5 600 msnm, es conocido como “clima de puna o páramo”. Esta zona presenta un clima lluvioso, con deficiencia

de lluvias en otoño e invierno, la humedad relativa es calificada como húmeda. En esta zona se ubica parte de las localidades de Cpazo, Larqueri, Lagunillas, Quillisani, Lampa, Mañazo, Crucero, Ñunoa, entre otros. Las temperaturas promedio anuales son próximas a 5° C, los veranos son siempre lluviosos y nubosos; los inviernos rigurosos y secos, la frecuencia de heladas puede superar los 150 días, las bajas temperaturas determinan una fuerte restricción al uso agrícola de la tierra.

D) Hidrografía

La región hidrográfica del Titicaca se caracteriza por una red de pequeños, mediados y grandes ríos, algunos de los cuales tienen importancia económica muy grande. Los principales ríos del territorio peruano que desembocan en el lago Titicaca son: al Norte Ramis y Huancané, al Oeste Coata e Illpa, al Sudoeste llave y Zapatilla. Del territorio boliviano, aportan sus aguas al lago Titicaca los siguientes ríos: al Norte el Haycho, Suhez y Keka, al Sur, Catari y Tiahuanacu.

d.1 Cuenca del río Ramis: que se encuentra enteramente en territorio peruano, que comprende el departamento de Puno y se extiende por las provincias de Sandía, S.A. Putina, Carabaya, Melgar, Azángaro, Lampa y Huancané.

Tiene una superficie de 15 541,7 Km². Su altitud máxima es de 5 828 msnm. En el nevado de Ananea y la mínima es de 3 850 msnm. en la estación hidrométrica del Puente Carretera Ramis.

El principal río que drena esta cuenca es el Crucero que nace en las cercanías del nevado de Ananea Grande y la laguna Rinconada. En su recorrido este río va tomando las denominaciones de Grande y Crucero, que tiene un recorrido en dirección de Este-Oeste y cerca de la población de Antauta cambia su curso a la dirección norte sur. En las cercanías de la población de Progreso, a 178 Km. de su origen confluye con el río Quenamari-Grande que tiene una longitud de 125 Km. La unión de ambos constituye el río Azángaro, que a los 255 Km. de su recorrido cerca de la población de Achaya recibe las aguas de los ríos Santa Rosa-Ayaviri-Pucará, con 184 Km. de longitud, cuyas nacientes se encuentran en los deshielos de los nevados de la cordillera del Vilcanota. Ya conformando el río Ramis por la anterior unión, desarrolla una longitud de 299 km.

La curva hipsométrica indica que esta cuenca es madura, con alta erosión en la cabecera de cuenca e inestable en su parte baja.

Este río, de apreciable caudal, en su recorrido sus aguas se ven incrementadas por los deshielos de Quenamari y Quelcayo para luego depositar las aguas en el extremo norte del lago Titicaca.

La configuración general de la gran cuenca del Ramís es la de una hoya hidrográfica de fondo amplio y de reducida pendiente que se extiende, por el

norte y por el Nor-Este, hasta los flancos de la cordillera Oriental y, por el sur, hasta las orillas del Lago Titicaca y la divisoria que lo separa de la cuenca del Coata, por el este, se limita con las cuencas de los ríos Huancané y Suches y, por el Oeste, con la Cordillera del Vilcanota y con la cuenca del río Coata.

Salvo en las pequeñas áreas correspondientes a sus nacientes, los ríos Pucara y Azángaro discurren por zonas caracterizadas por su topografía plana, las que por su altitud reciben el nombre de Altiplano. Esta característica ha dado origen a la formación de numerosas lagunas, algunas de las cuales son alimentadas por los deshielos de los nevados y otras son consecuencias del almacenamiento de las aguas de precipitación.

El río Ramís propiamente dicho nace en la confluencia de los ríos Pucara y Azángaro, a 6 km al este de la localidad de Cala Puja y a 3845 m.s.n.m.

El río Pucara, formador por la margen derecha del río Ramís, nace en las faldas del nevado Cunurrane y del lugar denominado la Raya, en la divisoria con las nacientes del río Urubamba, a una altitud de 3895 m.s.n.m. Se une al río Azángaro, para formar el Ramís, en la cota 3845 m.s.n.m. después de discurrir una longitud de 229,3 km.

El río Azángaro es formador del río Ramís por su margen izquierda. Nace de la unión de los ríos Ñuñoa o Grande y del Carabaya, la que se verifica aproximadamente a 7 km, al Nor-Este de la localidad de Asillo, a una altura de 3890 m.s.n.m. A partir de esta unión, el río Azángaro después de un recorrido de 6 km, a lo largo del cual recibe las aguas de las lagunas de Jallapise, por su margen derecha y de Turupampa y Satunda, por su izquierda, se une con el Pucara en la cota 3,845 m.s.n.m. para formar el río Ramis. Presenta una longitud de 287,3 km.

El río Ñuñoa o Grande tiene sus nacientes cercanas a los nevados de Quellopujo, Characharani y Quellococha, en la cota aproximada de 4,750 m.s.n.m.

Cabe anotar, en la zona de la margen izquierda del río Ramis, la existencia de la laguna Arapa, cuyo desague va al Lago Titicaca y se confunde en un solo pantano con los desagües de los ríos Ramis y Huancané.

d.2. Cuenca del río Huancané: al igual que el Ramis, esta cuenca se encuentra enteramente en territorio peruano, comprendida en el departamento de Puno y extendiéndose por las provincias de Azángaro y Huancané.

La superficie de esta cuenca es de 3 659,7Km². La altitud máxima es de 5 162 msnm. en el cerro Surupana y la mínima es de 3860 msnm. en la estación hidrométrica del Puente Carretera Huancané.

El principal río que drena esta cuenca es el Huanaco-Putina-Huancané, que nace cerca al cerro Ccala Cruz. En su recorrido este río toma la dirección Noreste - Sudeste y cerca de la población de Huatasani a 100 Km. de su

recorrido, confluye con el río Quellocarca-Tuyto, que tiene una longitud de 69 Km. la unión de ambos constituye el río Huancané, que alcanza una longitud de 125 Km. hasta la estación de aforo y antes de desaguar sus aguas al Lago Titicaca se une con el río Ramis.

a3. Cuenca del río Coata: Esta cuenca está comprendida enteramente en territorio Peruano, en el departamento de Puno y extendiéndose por las provincias de Lampa y San Román.

La superficie de esta zona es de 4 951,6 Km² con un perímetro de 314 Km. La altitud máxima es de 5475 msnm en el nevado Huayquera, seña de San Carlos Mina y la mínima es de 3835 msnm. para la estación hidrométrica del Puente Unocolla.

El principal río que drena esta cuenca es el Cañuma-Cabanillas-Coata, con nacientes en las cercanías de la laguna Lagunillas. La longitud que desarrolla es de 141 Km. a los 71 Km. de recorrido, el río recibe por su margen izquierda al río Quillisani, Verde que tiene una longitud de 56 Km. a los 136 Km, reciben el aporte de las aguas del río Palca-Lampa, que tiene sus nacientes en los deshielos del nevado Jatun Punta a 88 Km. de longitud, y pasan a conformar el río Ayabacas - Coata, cerca de Juliaca. La longitud total de este curso es de 141 Km. hasta la estación de aforo.

La curva hipsométrica indica que esta zona es madura, con erosión media en la cabecera de cuenca y estable en la parte baja. El índice de compacidad muestra una cuenca regular.

El río Coata, vierte sus aguas al norte de la Ciudad de Puno, en la bahía de Chucuito.

a4. Cuenca del río llave: Esta cuenca se encuentra enteramente en territorio peruano, está en el Dpto. de Puno y se extiende por las provincias de El Collao, Chucuito y Puno.

La superficie de esta zona es de 7 861,9 Km² con un perímetro de 478 Km. La altitud máxima es de 5 585 msnm. en el nevado de Larjanco y la mínima es de 3850 msnm. en la estación hidrométrica del Puente Carretera llave.

El eje principal de drenaje de esta cuenca está constituida por el Coypacoypa-Huenque-llave que nace cerca del nevado Larjanco. Entre las poblaciones de Ccataocollo a los 143 Km. de su recorrido, confluye con el río Blanco-Azufrini-Aguas Calientes que tiene una longitud de 113 Km. La unión de ambos constituye el río llave, cuya longitud total es de 163 Km. en la estación de aforo.

La curva hipsométrica indica que esta cuenca es madura, con alta erosión en la cabecera de cuenca, inestable en la parte baja. El índice de compacidad muestra una cuenca irregular.

a5. Cuenca del río Suchez: Esta cuenca se encuentra entre los territorios de Perú (Dpto. Puno: Provincia de Huancané) y Bolivia (Dpto. de La Paz: Provincias: Franz Tamayo y Camacho).

La superficie de esta cuenca es de 2 825 Km² con un perímetro de 339 Km.; la altitud máxima es de 5 829 msnm. en el nevado de Ananea Grande y la mínima es de 3817 msnm. en la estación hidrométrica. En territorio Peruano abarca un área de 1 171,2 Km².

Esta cuenca principalmente es drenada por el río Suchez, que en gran parte de su curso constituye el límite fronterizo entre las repúblicas de Perú y Bolivia. El río Suches tiene su origen en la laguna Suches y en los deshielos de los nevados Culijòn y Palomani Grande a 5 280 msnm. La dirección de su recorrido es de norte a sur, su longitud de 161 Km. Hasta la estación de aforo de Escoma (Bolivia).

a6. Cuenca del Titicaca: Esta cuenca circunlacustre está compartida entre las repúblicas de Perú y Bolivia. En territorio peruano comprende las provincias de Puno, Azángaro, Huancané, Moho, San Román, El Collao, Chucuito y Yunguyo todas ellas pertenecientes al Departamenteo de Puno. En territorio boliviano, comprende el Departamento de La Paz con sus provincias: Omasuyos, Manco Kapac y Los Andes en su integridad y parte de las provincias: Franz Tamayo, Bautista Saavedra, Camacho, Muñecas, Ingavi y Aroma.

La superficie de esta zona es de 22,937.6 Km², la altitud máxima es de 6421 msnm en el nevado de Illampu y la mínima es de 3810 msnm en la cota del nivel medio del lago Titicaca.

La superficie del espejo de agua del lago Titicaca es de 8400 Km², correspondiente a un nivel medio es de 3810 msnm., la profundidad máxima alcanza los 283 m.

La curva hipsométrica indica que esta zona es madura, con alta erosión en la cabecera de cuenca y estable en la parte baja. El índice de compacidad muestra una zona con alta irregularidad.

Dentro del sistema TDPS, la cuenca del lago Titicaca es reducida y en gran parte está cubierta por las aguas del lago Titicaca; representa al 39.1% del Sistema y ocupa su porción más septentrional, donde el altiplano se estrecha y las cordilleras occidental y oriental confluyen en un único sistema montañoso.

Las vertientes oriental y Nororiental son muy irregulares, con pendientes moderadas a altas y están constituidas por montañas y colinas de rocas sedimentarias, en gran parte disectadas y con importantes acumulaciones de material detrítico, especialmente fluvioglaciario. La red hidrográfica de este sector está bien organizada y densa, con procesos erosivos importantes, cuyos productos son transportados por los ríos Suchez, Huancané y especialmente por el Ramis, el cual forma un importante delta en la desembocadura al lago. Los valles de estos ríos y sus correspondientes terrazas fluviolacustres constituyen las zonas de mayor valor, pero presentan problemas de inundaciones y empantanamiento durante la estación de lluvias. El sector Suroriental es variado y se encuentra en un relativo estado de equilibrio, siendo sus principales

elementos la estrecha y abrupta cordillera oriental, la serranía de Corocoro, la llanura del río Catari y un conjunto de colinas que bordean el lago.

La vertiente occidental, en su mayor parte pertenece a la cordillera occidental, está constituida por macizos montañosos volcánicos de laderas redondeadas y amplias, intercalados con algunos relieves sedimentarios y tiene una inclinación moderada y regular hacia el noreste que continua en el lago Titicaca hasta su faja de mayor profundidad. En relación con esta morfología se han desarrollado zonas de llanura especialmente en la zona terminal de sus cuencas mayores (Ramis, Coata, llave e Illpa), ocupadas por depósitos fluviolacustres que en gran parte continúan bajo el nivel del lago y cuya margen frente a este se encuentra conformada por áreas hidromórficas.

a7. Cuenca del río Desaguadero: Tiene su origen en el extremo suroriental del lago Titicaca, en la parte sur de la laguna de Huiñaimarca. A través de este río el lago Titicaca desagua gran parte de su masa acuífera, la que deposita en el lago Poopo o Aullagas, en Bolivia. Además sirve de límite natural en un pequeño sector, entre Perú y Bolivia.

3.2 DETERMINACION DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS FISIOGRAFICOS

A) Superficie de la cuenca

- Área total de la cuenca (A): se considera a toda área de terrenos cuyas precipitaciones son evacuadas por un sistema común de cauces de agua estando comprendido desde el punto donde se inicia esta evacuación hasta la desembocadura u otro punto de interés.
- Área de la cuenca de recepción (Ar): es el área de la cuenca donde ocurre la mayor cantidad promedio de precipitación y está determinada desde una estación de aforos en el río principal hacia aguas arriba.
- Rango de altitud: es la diferencia entre la cota máxima y la cota mínima de la cuenca.

$$Aa = Hmax. - Hmin. \quad (3.1)$$

Donde:

Aa → Rango de altitud
 Hmax → Altitud máxima
 Hmin → Altitud mínima.

B) Perímetro de la cuenca

El perímetro de la cuenca se define como la longitud del contorno del área de la cuenca.

C) Forma de la cuenca

Determina la distribución de las descargas de agua a lo largo del curso principal; se expresa en los siguientes parámetros:

- **Coefficiente de compacidad o índice de Gravellius (K_c).**

Se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el área de la cuenca en estudio.

$$K_c = 0,28 \left(\frac{P}{A^{1/2}} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} K_c &= \text{Índice de compacidad} \\ P &= \text{Perímetro de la cuenca} \\ A &= \text{Área de la cuenca} \end{aligned}$$

Cuando el K_c de una cuenca se acerca a la unidad significa que habrá mayores posibilidades de crecientes debido a que los tiempos de concentración de los diferentes puntos de la cuenca serían iguales.

- **Factor de forma (F_f)**

Relación entre el ancho medio de la cuenca (A_m) y la longitud del curso de agua más largo. El ancho medio de la cuenca se obtiene dividiendo el área de la cuenca entre la longitud del curso de agua más largo, de acuerdo a la expresión (3.3).

$$F_f = \frac{A_m}{L} = \left(\frac{A/L}{L} \right) = \frac{A}{L^2} \quad (3.3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} F_f &= \text{Factor de forma} \\ A_m &= \text{Ancho medio} \\ A &= \text{Área de la cuenca} \\ L &= \text{Longitud del río} \end{aligned}$$

Una cuenca con factor de forma bajo está sujeta a menos crecientes.

El factor de forma es adimensional.

D) Elevación de los terrenos

- **Rectángulo equivalente**

Rectángulo que tiene la misma superficie de la cuenca, el mismo coeficiente de compacidad e idéntica repartición hipsométrica. Se trata de una transformación geométrica.

Los lados del rectángulo equivalente están dados por las fórmulas siguientes:

$$L = \frac{K_c}{1,12} \sqrt{A} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (3.4)$$

$$l = \frac{K_c}{1,12} \sqrt{A} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (3.5)$$

Siendo:

L	=	lado mayor del rectángulo
l	=	lado menor del rectángulo
K_c	=	coeficiente de compacidad

Debiendo verificarse que:

$$L + l = P/2 \text{ (semiperímetro)}$$

$$L \times l = A$$

E) Declividad de los Alveos

- **Pendiente media (Ic)**

Se obtiene dividiendo la diferencia total de la altitud mayor del cauce (H_M -m) y la altitud menor del cauce (H_m -m) entre la longitud horizontal (L -km) del curso de agua entre esos dos puntos:

$$S(\%) = \left(\frac{H_M - H_m}{1000 * L} \right) * 100 \quad (3.6)$$

Donde:

H_M	=	Altitud mayor en metros
H_m	=:	Altitud menor en metros
L	=	Longitud del curso de agua en Km

- **Perfil longitudinal (S)**

Taylor y Schwarz proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme, que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión.

Estos autores llegan a la conclusión de que en el caso, de que los tramos no sean iguales la pendiente se encuentra dada por la siguiente expresión, la expresión matemática es:

$$S_{eq} = \left[\frac{L}{1 + \sqrt{S_1}} \right]^2 \quad (3.7)$$

Donde:

$$\begin{aligned} L &= \text{longitud del río en un tramo} \\ S_1 &= \text{pendiente en el tramo} \end{aligned}$$

3.3 INFORMACION REQUERIDA Y EQUIPOS

3.3.1 Recopilación de información

a) Cartográfica:

Para el estudio se contó con el apoyo cartográfico siguiente:

- Mapa físico político del Perú a escala 1: 1000 000, publicado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Mapa de la Hoya del Titicaca escala 1:1000,000 publicado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.
- Mapas de las cuencas (Ramis, llave, Coata, Huancane) a escala 1:100,000 publicado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- Mapa de clasificación climática del Perú a escala 1: 1000,000 publicado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.
- Delimitación y codificación de unidades hidrográficas, publicado por la Autoridad Nacional del Agua - ANA, 2008.

b) Información meteorológica e hidrológica:

Se ha utilizado la información meteorológica e hidrológica siguiente:

- Precipitación total mensual, en milímetros (mm)
- Precipitación Mínima mensual, en milímetros (mm)
- Precipitación Máxima mensual, en milímetros (mm)
- Temperatura promedio mensual, en grados centígrados (°C)
- Temperatura mínima mensual, en grados centígrados (°C)
- Temperatura máxima mensual, en grados centígrados (°C)
- Humedad relativa media mensual, en porcentaje (%)
- Velocidad del viento, en metros por segundo (m/s)
- Horas de sol (horas)
- Caudal promedio mensual (m³/s).

La información hidrológica y meteorológica ha sido recopilada del Banco Nacional de Datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI.

c) Red hidrológica y meteorológica:

Para el estudio se consideró el mayor número de estaciones ubicadas dentro y alrededor de la cuenca, las que se detallan en la **Tabla 3.1** y su ubicación se muestra en el **Mapa Est.**

3.3.2 Período de análisis

UNESCO – Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del sur, 1982; un balance puede ser realizado para distintos períodos de tiempo, pero está condicionado a la información hidrológica y meteorológica disponible, en el presente estudio y teniendo en consideración la longitud de las series estadísticas correspondientes de los parámetros a usar, se estableció que el período de análisis sea el comprendido entre los años 1969 y 2010.

3.3.3 Equipos

Para la elaboración del presente estudio se ha contado con el apoyo de los siguientes equipos:

Computadora Personal e impresora
Software: Windows XP
Surfer 8, 0
Sistema de información geográfica (SIG)
ArcGis/Arcview
Minitab
Lrap

Internet
Hydracces

3.4 METODOLOGIA

3.4.1 Trabajo de campo

En esta parte del estudio, se realizaron trabajos de reconocimiento integral del estado geomorfológico de la cuenca, así como también de la identificación y evaluación de cada una de las estaciones hidrológicas y meteorológicas ubicadas en la zona de estudio.

➤ Reconocimiento integral de la cuenca

La cuenca endorreica del Titicaca, se ubica en el extremo sur del Perú entre Perú y Bolivia, ocupando un área total de 61 102 km², de los cuales 48 775 km² se encuentran en territorio peruano, incluyendo la porción correspondiente al lago. Esta cuenca en territorio peruano se ubica entre los 15°07' y 16°15' de latitud sur y 68°35' y 70°08' de longitud oeste. (Fuente: Atlas hidrológico 1976 del SENAMHI). Y en territorio boliviano llega hasta los 17°20' de latitud sur y 71°10' de longitud oeste.

Geográficamente, limita por el norte, con las cuencas de los Urubamba, Alto Ucayali e Inambari, al noreste, con las cuencas de los ríos Camana – Majes y Tambo, al oeste con las cuencas de los ríos Locumba, Sama y caplina y, al sur con la Republica de Bolivia.

La Región del Titicaca está conformada por los ríos cuyo origen se encuentra en las cumbres andinas, y que vierten sus aguas en el Lago Titicaca. Esta región se encuentra ubicada en la Meseta del Collao, limitada por la Cadenas Oriental y Occidental de los Andes del Sur y el Nudo de Vilcanota. Los ríos forman extensos valles en las proximidades de su desembocadura, cuyas áreas bajas son inundables durante la época de creciente, afectando el cultivo. Asimismo estos valles son los principales centros agrícolas de la región, destacando el cultivo de la papa, el trigo, la quinua y la cebada. A orillas de estos ríos se encuentran las principales ciudades y centros poblados como Juliaca, Lampa, Azángaro, Ayaviri, Pucará, entre otras.

Los ríos del Titicaca tienen sus origen en las Cadenas Occidental, en la Cordillera Volcánica y Oriental, en la Cordillera de Carabaya, y la Cordillera de Vilcanota o Nudo de Vilcanota, en los Andes del Sur, son de corta longitud y poco torrentosos, al discurrir sobre la Meseta del Collao son de suave declive, por lo que son poco torrentosos. El caudal de estos ríos caudal variable a lo largo del año. Su caudal se ve incrementado durante el período de lluvias, entre

los meses de Diciembre a Marzo, provocando en algunos casos la inundación de extensas áreas próximas al Lago. Luego su caudal disminuye durante los meses de Junio a Noviembre.

La vertiente tiene forma elipsoidal, en la parte peruana posee dos zonas importantes, la de nacientes (tributarios), con aporte medio anual de 150,0 m³/s y la zona del lago con una lluvia media anual de 710 mm/año.

El relieve de las cuencas, es variable pudiendo establecerse dos zonas: una alta, en la cual la hoya hidrográfica escarpada, de fondo profundo y quebrado con pendiente relativamente fuerte, y otra baja en la cual la hoya es plana poco escarpada alargada y de desnivel gradual, pero de cauce ancho y profundo. El discurrir de la mayoría de los ríos es muy sinuoso en su parte alta y radial en la parte baja.

El lago tiene un largo de 176 km y 50 km de ancho, su área es de 8 300 km² de los cuales 4 996 km² corresponden al Perú y 3 304 km² a Bolivia. El lago en conjunto consiste de tres partes importantes: El lago grande, la bahía de Puno y el lago pequeño hacia el sureste de Yunguyo. El lago Titicaca es una gran masa de agua, que ocupa una depresión en el extremo norte de la meseta del Collao, es el lago navegable más alto del mundo y el volumen de agua promedio es de 932, 000 MMC, de los que aproximadamente el 3% se renueva cada año.

El Nivel Medio: 3.810 m s.n.m. (el rango de fluctuaciones promedio en el tiempo es de + 2.5 m), su profundidad máxima es de 283 m, profundidad media es de 105 m y su perímetro es de 1 750 km.

➤ **Operación y funcionamiento de la red hidrometeorológica**

La vertiente tiene una red hidrometeorológica importante, especialmente en sus cuatro cuencas principales (Ramis, Huancane, Coata, e llave), que en la actualidad se cuenta con treintaseis (34) estaciones climatológicas operativas y ocho (08) hidrológicas, todas ellas se ubican en los diferentes niveles altitudinales de la cuencas, las mismas que son administradas por El Senamhi.

Cuenca del río Ramis: en esta cuenca se localizan catorce estaciones climatológicas y tres hidrológicas, las mismas que se encuentran ubicadas desde los 3850 msnm hasta los 4200 msnm, las registran información meteorológica e hidrológica en esta parte de la región.

Las estaciones hidrológicas se localizan en la subcuenca del río Ayaviri, otra en la subcuenca del río Azangaro y una estación integradora en parte baja de la cuenca, es en esta última donde se realizan actividades de aforos y además cuenta con una estación automática que remite información en tiempo real.

Cuenca del río Huancane: en esta cuenca se localizan tres estaciones climatológicas y una hidrológica, las mismas que se encuentran distribuidas de manera estratégica en la zona, de tal forma que son representativas de la zona. La estación hidrológica se localiza, se registra todo el escurrimeitno superficial de la cuenca y es donde se registran actividades de aforo.

Cuenca del río Coata: en esta cuenca se localizan seis estaciones climatológicas y dos hidrológicas, una de ellas sobre uno el río Lampa y otra sobre el río Coata, las estaciones que registran varaibles climaticas se encuentran distribuidas de manera estratégica en la zona, registrando información representativa de la zona.

La estación hidrológica Puente Unocolla, sobre el río Coata, registra todo el escurrimiento superficial de la cuenca y es donde se relizan aforos.

Cuenca del río llave: en esta cuenca se localizan cinco estaciones climatológicas, las mismas que están distribuidas de manera estratégica, registrando información representativa de la zona; además se cuenta con dos estaciones hidrológicas, una de ellas en río Zapatilla y otra sobre el río mismo río llave, en ambas se realzian actividades de aforo.

Ademas se cuentas con cuatro estaciones (Isla Taquile, Los Uros, Isla Suana y Tahauco Yunguyo) en la zona circunalcustre que registra las variabilidad climatica de esta parte de la vertiente; una que registra los niveles de agua del lago (Estacion Muelle ENAFER), además de la estación Desagudero, en la cuenca del Callaccame. En las Fotos 1,2, 3 y 4 se muestra algunas de la estaciones de esta región.



Foto 1. Vista de la estación HLG Ayaviri



Foto 2: Vista de la estación HLG Huancane



Foto 1. Vista de la estación CO Juliaca

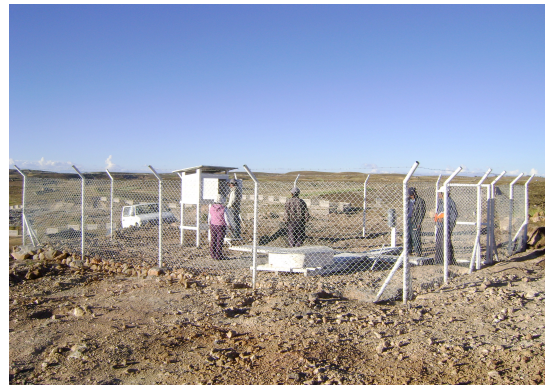


Foto 2: Vista de la estación CO llave

3.4.2 Trabajo de gabinete

A) Análisis de precipitación

El proceso de la precipitación no es tan sencillo como parece, sino hace falta una serie de condiciones previas en la atmósfera tales como la existencia de vapor de agua en grandes proporciones; este vapor debe ascender y condensarse en la altura formando nubes, y que las condiciones dentro de las nubes permita que las pequeñísimas partículas de agua e hielo aumenten de tamaño y peso, suficiente para caer desde la nube y llegar al suelo.

Este fenómeno se da por la condensación del vapor de agua con tal rapidez en la atmósfera alcanzando tal peso que no pueda seguir flotando como las nubes, la niebla o la neblina (cuyas partículas están suspendidas o se depositan directamente sobre la tierra en forma de rocío o escarcha) y se precipita de las diversas formas ya mencionadas.

Se entiende por precipitación a todo aquello que cae de la atmósfera a la superficie de la tierra, ya sea en forma de lluvia, granizo, pedrisco, nieve, etc.

Los factores que determinan el desigual reparto de las precipitaciones son múltiples y complejos, desde los de ámbito general hasta los regionales o locales.

Los **factores de alcance general** son los responsables de que en los climas ecuatoriales las lluvias sean fundamentalmente de convección, y en los climas tropicales las estaciones lluviosas coincidan con los solsticios.

Los **factores regionales** o locales determinan aspectos tales como la mayor humedad de las zonas costeras y la mayor frecuencia de lluvias en las barreras montañosas, en especial en su vertiente orientada al mar.

Este parámetro se puede considerar como el más importante que interviene en el balance hídrico y la exactitud en su medición y su evaluación es determinante en el resultado.

Sin embargo, a pesar de su importancia no se puede estimar con un alto grado de exactitud ya que su evaluación es afectada por dos tipos de errores:

- Error en la medida puntual
- Error en la medida espacial.

Su evaluación requiere estudiar y analizar:

- Error en la medida

- Consistencia y ajuste de las estadísticas
- Ampliación de los registros
- Evaluación de la precipitación espacial
- Régimen pluviométrico de un lugar, zona o región

▪ **Análisis de consistencia de datos:**

Aliaga, 1983, la no homogeneidad e inconsistencia en secuencias hidrológicas representa uno de los aspectos más importantes del estudio de la hidrología, particularmente en lo relacionado a la conservación, desarrollo y control de los recursos hídricos

Los datos pluviométricos a nivel mensual, recopilados y automatizados, se procesaron con el fin de determinar su confiabilidad y consistencia, la que consiste en determinar si la información de precipitaciones registradas en cada una de las estaciones (PLU y CO) son representativas de la zona y no presentan ningún tipo de error.

El primer paso al efectuar la evaluación espacial de la precipitación es verificar que el período de la estadística pluviométrica que se va a utilizar sea consistente; quiere decir que la estación haya sido observada durante el período en la misma forma, criterio y que su instalación no haya sufrido variaciones de ningún tipo.

El consistenciado de la información comprende la elaboración de tablas con valores promedios a nivel mensual y anual de la variable precipitación, la construcción de histogramas, curvas de doble masa y pruebas estadísticas, con el fin de identificar y si es necesario cuantificar inconsistencias, saltos o tendencias de los datos.

- Histogramas: son gráficos que se construyen en coordenadas cartesianas, ploteando la precipitación con el tiempo.
- Curva doble masa: consiste en llevar los valores acumulados de la estación en estudio y en la abscisa los valores acumulados de una estación patrón, que viene a ser el promedio de varias estaciones índices.
- Pruebas estadísticas: comprende el empleo de los tests de: T – student y F – Fisher, con la finalidad de cuantificar la inconsistencia de la información.

Mediante la prueba de T de Student se analiza si los valores son estadísticamente iguales, es decir probar que ambos valores provienen de la misma población.

▪ Doble masa

Este método es aplicado en cada grupo de análisis considerado; consiste en calcular un patrón de precipitaciones anuales (PPA) como el promedio anual de un conjunto de estadísticas pluviométricas que se considera son las mejores y más largas del grupo; el PPA se acumula año a año obteniéndose una serie de valores anuales acumulados.

Comparando con el PPA acumulado las precipitaciones anuales acumuladas de cada estación (X) y llevando los pares de valores (ΣPPA , ΣP_X) a un gráfico, los puntos quedarán alineados si la estación (X) ha sido bien observada, lo que indicaría que su estadística es consistente, si se produce un quiebre a partir de un determinado año, la estadística de la estación (X) no es consistente y debe corregirse.

Para realizar la consistencia de la información pluviométrica fue necesario agrupar las estaciones bajo los siguientes criterios:

- * Ubicación dentro y fuera de la cuenca
- * Proximidad entre estaciones (latitud y longitud)
- * Intervalo de altitudes.

Para el estudio se utilizó el método de doble masa para el consistenciado, empleando el siguiente procedimiento:

- Se seleccionó el período común de información del grupo de estaciones utilizadas en el estudio.
- Se determinó las precipitaciones totales anuales para cada estación; para los datos faltantes a nivel mensual, se procedió a reemplazar temporalmente por los promedios mensuales de la serie, solamente para aquellos años que tuvieran como máximo 6 datos faltantes.
- Posteriormente los valores anuales determinados fueron acumulados en orden cronológico, a partir del año más antiguo (1969) hasta el más reciente (1999).
- Se procedió a graficar cada uno de los valores de las precipitaciones acumuladas de cada estación con el promedio acumulado de ellas, con el fin de determinar la estación patrón en cada grupo.
- Si los puntos ploteados presentan una sola tendencia, es decir si se puede trazar por ellos una recta sin quiebres, significa que la estadística de la estación es consistente.

- Si los puntos presentan quiebres o mucha dispersión, la estadística no es consistente y se procede a su corrección o eliminación del análisis.
- Las estaciones cuyas precipitaciones registren diferentes pendientes (quiebres), serán ajustadas mediante la multiplicación de esos valores por un factor de corrección cuya expresión matemática es:

$$\beta_i = \frac{m_2}{m_1} \quad (3.8)$$

Donde:

B_1 → Factor de corrección

m_1 → Pendiente de la recta del período más antiguo

m_2 → Pendiente de la recta del período más reciente

La expresión se utiliza para corregir los valores inconsistentes del período más antiguo, y si requiere corregir el período más reciente la relación entre pendientes se invierte.

A cada uno de los períodos seleccionados, de acuerdo al quiebre de la información, se ajusta a una ecuación de regresión lineal del tipo:

$$Y = mX + b \quad (3.9)$$

$$Y = mX \quad (3.10)$$

Donde:

Y → Variable dependiente

X → Variable independiente

m → Pendiente de la recta a determinarse

b → Constante a determinarse

- Con la estadística ajustada, se procede nuevamente a realizar el proceso de análisis de doble masa, con el fin de corroborar el análisis.

El grupo de estaciones seleccionadas en la cuenca del río Caplina, después de ser analizada su consistencia y ajustada, quedo lista para el proceso de completado y extensión de los datos de precipitaciones totales anuales.

- **Completar y/o utilizar información para su extensión**

Es esencial que en el balance hídrico intervenga el máximo número de registros pluviométricos, por lo cual es necesario establecer métodos que permitan estimar precipitaciones anuales del período 1969 - 2010, de aquellas estaciones que contengan información estadística incompleta.

Comprobada la consistencia del registro, es necesario completar los datos faltantes por medio de métodos estadísticos – matemáticos, la que debe asegurar al especialista que esta no altera sustancialmente los indicadores poblacionales.

Dentro de los métodos estadísticos utilizados en el presente fueron los modelos de regresión lineal simple y múltiple.

Análisis de regresión lineal simple (RLS) consiste en graficar el diagrama de dispersión, ajustar una recta a ese diagrama de dispersión, esta recta es llamada línea de regresión se usa para completar y extender la información faltante.

La ecuación de RLS comprende una variable aleatoria dependiente (Y_i) y una variable aleatoria independiente (X_i) y los coeficientes de la ecuación de regresión (α . β) donde α es el punto de intersección entre la línea de regresión y el eje "Y" ; y β es el coeficiente de regresión o pendiente de la línea. el mismo que explica cuán rápido aumenta o disminuye la variable "Y" con un cambio de "X".

Su expresión matemática es:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i \quad (3.11)$$

Es frecuente que en una estación falten datos de la precipitación, por tanto, es conveniente disponer de un método para estimarlas y así poder completar la información, en el presente estudio se obtendrá empleando este método descrito.

- **Estimación de la precipitación a nivel mensual**

Analizada la información anual de la serie histórica, se procede a completar los valores mensuales faltantes en la serie, los cuales se generaran en base a pesos porcentuales de cada uno de los meses en cada estación.

▪ Estimación de la precipitación media areal

Para evaluar la precipitación caída en una zona de la superficie terrestre, es indispensable basarse en valores puntuales.

Para determinar la precipitación media de la cuenca se puede realizar, entre otros, por los métodos:

- Media aritmética
- Polígono de Thiessen
- Isoyetas
- Kringin
- Inverso de la distancia

Gómez 1987, el método más preciso para evaluar la precipitación espacial es el de Isoyetas; obtenidos los valores puntuales de precipitación en todas las estaciones seleccionadas de la cuenca, se procedió a plotear en un mapa las estaciones y sus cantidades de lluvia, luego se interpola para obtener isolíneas de igual valor pluviométrico en la cuenca y subcuencas respectivas.

Este método nos permite estimar la variación paulatina de las precipitaciones en el espacio, aún en zonas montañosas.

La precipitación promedio sobre el área de la cuenca se evalúa ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas por el área entre isoyetas, relación que se expresa por la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{\sum AP}{A_T} \quad (3.12)$$

Donde:

P_m	=	Precipitación media de la cuenca
AP	=	área parcial entre isoyetas
A_T	=	área total de la cuenca

Los valores areales se determinaran con el software Hydracces, que contiene un modulo de valores medios sobre la cuenca.

Para ello primeramente se realiza un grillado cada 10 km en la zona de interes, donde se estima los valores de precipitación en cada vértice de la cuadrícula, que permiten generar las series para la interpolación de las isolíneas.

Al realizar el procesamiento este software también te permite encontrar los valores areales para cuenca de interés, para ello debe ingresar en formato shape el perímetro de la cuenca en forma de polígono.

Para nuestro caso la precipitación media areal se la obtenida al promediar, los valores obtenidos por los métodos de Thiessen, inverso a la distancia y Kriging.

La interpolación de las isoclinas se realizara con ayuda del software ArcGis y Arcview.

B) Análisis de temperatura

Aquí se realizará un estudio completo de las temperaturas a nivel anual y mensual, considerando los valores mínimos, máximos y medios, para todas las cuencas de la Region Hidrografica del Titicaca (Ramis, Huancane, Coata e llave).

La información seleccionada para tal fin, corresponde a las estaciones Climatológicas Ordinarias ubicadas dentro de la zona de estudio y de estaciones de apoyo ubicadas en cuencas vecinas, tal como se puede observar en la **Tabla 3.2.**

▪ Determinación de la temperatura a nivel mensual

Analizada la información a nivel mensual y anual, se pasó a completar la serie de datos mensuales, para lo cual se procedió de la misma forma que en el análisis de la precipitación, determinándose los diferentes factores de corrección, mediante los cuales se determinarán los valores de las temperaturas medias mensuales para cada una de las estaciones.

Con dicha informacion de temperatura (media, mínima y máxima) para cada mes, y con el mismo grillado construido para precipitación equidistante cada 10 km en la dirección vertical y horizontal. Este grillado servirá de base para generar la información en cada vértice de cada grid o cuadrícula regular, valores de temperatura (media, minima y máxima) mensual, representando cada punto una “estación virtual”, la cual se realiza con software Hydracces.

C) Análisis de humedad relativa, viento y horas de sol

▪ Humedad relativa

Variable que se analiza, con información de las estaciones que se ubican en toda en el ámbito de toda la Región Hidrografica y asi como de estaciones de cuencas vecinas como Camana- Majes, Locumba, Sama y

Caplina. Con información histórica de humedad relativa media a nivel mensual de las estaciones seleccionadas (**Tabla 3.3**), se realizaron análisis estadísticos que nos permitieron conocer las características, distribución y comportamiento de estos parámetros en forma espacial y temporal.

Asimismo con el mismo grillado construido para precipitación equidistante cada 10 km en la dirección vertical y horizontal, servirá de base para generar en información en cada vértice, representando cada punto una “estación virtual”.

- **Viento y horas de sol:**

Estas variables se analizaron en toda la vertiente, con información de la zona de estudio e incluyendo estaciones de las cuencas de ríos Camana-Majes, Tambo, Ilo –Moquegua, Locumba, Sama y Caplina.

Para el análisis recurrimos a información histórica, tal como se muestra en las **Tablas 3.3**. Para el análisis de viento y horas de sol se han considerado un total de 34 y 06 estaciones respectivamente, las cuales nos permitirán conocer el comportamiento de la distribución espacial y temporal de ambas variables dentro de las zonas de estudio.

Con el mismo grillado construido para precipitación equidistante cada 10 km en la dirección vertical y horizontal, servirá de base para generar en cada vértice de cada grid o cuadrícula regular, valores de viento y horas de sol, representando cada punto una “estación virtual”.

D) Estimación de la evapotranspiración

La determinación de esta variable, puede ser realizada mediante la aplicación de las fórmulas empíricas desarrolladas por los diferentes investigadores, en su deseo de encontrar la forma práctica de describir conceptualmente, cada una de las variables que inciden en forma directa en la pérdida de agua por los diferentes procesos descritos en la parte de la revisión bibliográfica.

A fin de realizar una comparación cualitativa y cuantitativa entre los diferentes métodos indirectos y directos más importantes, utilizados en la determinación de la evapotranspiración, se describe a continuación cada uno de ellos (SIAR, 2001):

- **Cubeta**

El tanque de evaporación permite estimar los efectos combinados de radiación solar, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie de agua libre. De un modo análogo, la planta responde a

las mismas variables climáticas. El método del tanque de evaporación permite relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) (Inia, 2001).

Existe una íntima relación entre los procesos de evapotranspiración del cultivo y la evaporación del Tanque Clase "A" por lo que este método es de gran utilidad para determinar la ET_o a partir de la evaporación de un tanque de agua. Existen diversos modelos de tanques, pero el más utilizado es la cubeta evaporimétrica "Clase A" del "Weather Bureau" de los EE.UU. Este recipiente es circular, de hierro galvanizado, con dimensiones de 120,7 cm de diámetro y 25,4 cm de profundidad, y se monta sobre la plataforma de madera que permite situar el fondo a unos 15 cm sobre el nivel del suelo.

Doorembos y Pruitt (1974, 1977) proponen un método para la predicción de la ET_o a partir de los datos medidos de evaporación de una lámina libre de agua en la cubeta "Clase A". La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$ET_o = K_t * E_v \quad (3.13)$$

Donde:

- ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)
- K_t es el factor de corrección, que se calcula para un tanque sobre hierba mediante la ecuación 3.13.

$$k_t = 0.108 - 0.00033 * U_d + 0.0422 \ln(fetch) + 0.1434 \ln(Hrmed) - 0.000631 [\ln(fetch)]^2 * [\ln(Hrmed)] \quad (3.14)$$

Donde:

- fetch = distancia de cobertura verde en la dirección predominante del viento (m)
- Hrmed = humedad relativa media (%)
- U_d = velocidad del viento diurna a 2 m de altura (m/s)

Los valores de estos parámetros deben estar comprendidos entre los siguientes intervalos:

30	<	Hrmed	<	84%.
0,97	<	U_d	<	8,1 m/s.
1	<	"fetch"	<	1000

▪ **Blaney – Criddle modificado por Fao:**

El método original de Blaney-Criddle (Blaney y Criddle, 1950) se basó en estudios de correlación entre la temperatura y el uso del agua en el oeste de EE.UU. Con el fin de definir mejor los efectos de clima sobre la evapotranspiración. La modificación de FAO del método de Blaney-Criddle es la siguiente:

$$ET_o = a_b + b_b * f \quad (3.15)$$

Donde:

- ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)
- f es el factor de uso consuntivo dado por la ecuación 3.15 en mm/día
- a_b y b_b son los valores de ecuaciones 3.16 y 3.17.

$$f = P * (0.46 * t + 8.13) \text{ utilizando } ^\circ C \quad (3.16)$$

Donde:

- f = factor consuntivo (mm/día)
- t = porcentaje de horas de sol diarias anuales durante el período considerado (%)
- P = período considerado (días).

$$a_0 = 0.043 * Hr \text{ min} - \frac{n}{N - 1.41} \quad (3.17)$$

$$b_b = a_0 + a_1 * HR_{\min} + a_2 * \frac{n}{N} + a_3 * U_d + a_4 * HR_{\min} * \frac{n}{N} + a_5 * HR_{\min} * U_d \quad (3.18)$$

Donde:

- HR_{\min} = humedad relativa mínima (%); n/N = fracción de insolación
- U_d = velocidad del viento tomada a 2 m de altura (m/s).

Los coeficientes de regresión son:

- $a_0 = 0,81917$
- $a_1 = -0,0040922$
- $a_2 = 1,0705$
- $a_3 = 0,065649$
- $a_4 = -0,0059684$

- $a_5 = -0,0005967$

- **Hargreaves**

La fórmula que plantea Hargreaves es la que se presenta a continuación:

$$ET_o = 0.0023 * R_A * (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} * (T_{\text{med}} + 17.8) \quad (3.19)$$

Donde:

- $T_{\text{med}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$
- R_A = radiación extraterrestre (mm/día)
- T_{\max} = temperatura máxima (°C)
- T_{\min} = temperatura mínima (°C),
- T_{med} = temperatura media (°C).

- **Método Climdata (1981)**

Se emplean los datos mensuales de (Uct, 2001)

T = temperatura media mensual, en °C

H.R. = humedad relativa media mensual, en %

Para calcular la Evapotranspiración Potencial como:

$$ETP = 0.31 * (T + 2) * T - 1.67 * (HR - 76) \quad (3.20)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración en mm/día

- **Método de Turc**

Emplea la expresión matemática siguiente (Uct, 2001):

$$ETP = 0.013 * \left(\frac{T}{T + 15} \right) * (RS + 50) * \left(1 + \frac{65 - HR}{120} \right) \quad (3.21)$$

Donde:

- ETP = evapotranspiración en mm/día
- T = temperatura media mensual, en °C
- RS = radiación solar media mensual, en cal cm⁻² min⁻¹.
- HR = humedad relativa media mensual, en %

También existe el método modificado de Turc, el cual está dado por la expresión matemática siguiente (Musy, 2001):

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (3.22)$$

Donde:

- ET : Evapotranspiración en [mm],
 P : Precipitación total anual en [mm]
 T : Temperatura media anual [°C].
 $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$.

▪ Penman – Fao

La ecuación original de Penman estimaba las pérdidas de agua por evaporación en una superficie libre de agua (E_o). La fórmula es la que se presenta a continuación:

$$ET_o = c * \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * Rn_1 + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} * 2.7 * (1 - 0.01 * U_2) * DPV_1 \right] \quad (3.23)$$

Donde:

- c = factor de corrección
- D = pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire (kPa/°C)
- G = constante psicométrica (kPa/°C)
- Rn_1 = radiación neta (mm/día)
- u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (km/día)
- DPV_1 es el déficit de presión de vapor (kPa).

$$DPV_1 = (e_{s1} - e_{o1}) \quad (3.24)$$

Donde:

- e_{s1} = presión de vapor en saturación (kPa)
- e_{o1} = presión actual de vapor (kPa)

Calculados por las ecuaciones siguientes:

$$e_a = 0.6108 * e^{\left[\frac{17.27 * T_{med}}{T_{med} + 237.3} \right]} \quad (3.25)$$

$$e_{D1} = e_{S1} * \frac{HR_{med}}{100} \quad (3.26)$$

Donde:

- Tmed = Temperatura media diaria (°C)
- Hmed = humedad relativa media (%)

En el cálculo de D se utilizó la expresión 3.26, y en el de g la expresión 3.27.

$$\Delta = \frac{4098 * e_{S1}}{(T_{med} + 237.3)^2} \quad (3.27)$$

$$\gamma = \frac{0.0016286 * P}{\lambda} \quad (3.28)$$

Donde:

- P = presión atmosférica (kPa)
- g = calor latente de vaporización (MJ/kg)

Calculados como:

$$P = 101.3 * \left[\frac{(293 - 0.0065 * altitud)}{293} \right]^{5.296} \quad (3.29)$$

Donde:

- altitud = altura sobre el nivel del mar (m).

$$\lambda = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) * T_{med} \quad (3.30)$$

Donde:

- Tmed = temperatura media (°C)

La radiación neta fue calculada utilizando la expresión:

$$Rn_1 = (1 - \alpha) * R_s - R_b \quad (3.31)$$

Donde:

- A = albedo de la superficie (a = 0,25 para una pradera)
- Rs = radiación global (mmdía⁻¹)

- R_b = pérdida de radiación neta de onda larga (mmdía^{-1}).

$$R_b = \left(\frac{0.9 * n}{N} + 0.1 \right) * (0.34 - 0.139 * e_D^{1/2}) * s * T^{-4} \quad (3.32)$$

Donde:

- s = constante de Stefan-Boltzmann ($s=4,9*10^{-9}\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}\text{k}^{-4}$)
- T = temperatura absoluta en K ($T = T_{\text{med}} + 273,16$)
- n/N = relación entre el número de horas de sol (n) y el número máximo de horas de sol (N) para la fecha evaluada.

El factor de corrección C fue ajustado por Allen y Pruitt (1991):

$$C = 0.892 - 0.0781 * U_d + 0.00219 * U_d * R_s + 0.000402 * H_{\text{max}} * R_s + 0.000196 * \left(\frac{U_d}{U_n} \right) * U_d * H_{\text{max}} + 0.0000198 * \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2 * H_{\text{max}} * R_s + 0.00000236 * U_d^2 * H_{\text{max}} * R_s - 0.0000086 * \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2 * U_d * H_{\text{max}} - 0.000000292 * \left(\frac{U_d}{U_n} \right) * U_d^2 * (H_{\text{max}})^2 * R_s - 0.0000161 * H_{\text{max}} * R_s \quad (3.33)$$

Donde:

- U_d = velocidad del viento diurna a 2 m de altura (m/s)
- H_{max} = humedad relativa máxima (%)
- $U_d/U_n = 2$, es la relación entre la velocidad del viento diurna y (7:00 as 19:00 h) y nocturna (19:00 as 7:00 h) que es el valor promedio.

Los límites de validez en la ecuación 3.32, cuando los datos de entrada los superen, se deben adoptar los límites especificados:

- | | | | | | |
|---|----|---|------------------|---|------------|
| • | 3 | < | R_s | < | 12 mm/día. |
| • | 30 | < | H_{max} | < | 90 %. |
| • | 0 | < | U_d | < | 9 m/s. |
| • | 1 | < | U_d/U_n | < | 4. |

▪ Penman – Monteith

Monteith (1965) desarrolló un modelo que incluye, en el modelo de Penman, la resistencia a la superficie de la cubierta vegetal, quedando de la siguiente manera:

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (Rn_1 - G) + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} * K_1 * \left(0.622 * \lambda * \frac{\rho}{P} \right) * \frac{1}{R_A} * DPV_2 \quad (3.34)$$

Donde:

- ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)
- Rn_2 = radiación neta calculada por el método de Wright, (1982)(MJm²/día)
- G = flujo de calor del suelo (MJm²/día)
- K_1 = coeficiente de conversión de unidades ($K_1=8,64$ si la velocidad media del viento a 2 m de altura (U_2) se expresa en m/s y $K_1= 10^3$ si U_2 se expresa en km/día)
- DPV_1 = déficit de presión de vapor (kPa).

$$l' = l * \left(1 + \frac{r_C}{r_A} \right) \quad (3.35)$$

Donde:

- l = calor latente de la evaporación (MJ/kg)
- r_A = resistencia aerodinámica (s/m)
- r_C = resistencia de la cubierta (s/m)

$$r_C = \frac{100}{(0.5 * IAF)} \quad (3.36)$$

El índice de área foliar (IAF) se puede estimar de la siguiente manera:

$$IAF = 0,24 h_C.$$

El valor de r_A en condiciones neutras de estabilidad de la atmósfera es:

$$r = \frac{\left[\ln\left(\frac{Z_m - d}{Z_{nm}}\right) \right] * \left[\ln\left(\frac{Z_b - d}{Z_{nb}}\right) \right]}{k^2 * U_x} \quad (3.37)$$

Donde:

- Z_m = altura de medida del viento (m)
- Z_h = altura de medida de la temperatura y la humedad relativa (m)
- D = altura del plano cero (m)
- Z_{om} = longitud de la rugosidad para transferencia de cantidad de movimiento
- Z_{oh} = longitud de la rugosidad para transferencia de calor sensible y calor latente

- k = constante de von Karman ($k = 0,41$)
- U_2 = velocidad del viento a la altura z (m/s)

$$Z_{om} = 0.1236 * hc \quad (3.38)$$

$$Z_{oh} = 0.0123 * hc \quad (3.39)$$

$$d = 0.67 * hc \quad (3.40)$$

$$Rn_2 = (1 - a) * R_s - R_b \quad (3.41)$$

Donde:

- hc = altura del cultivo (m)

La pérdida de radiación neta de onda larga R_b se calcula con la ecuación 3.41.

$$R_b = \left[\frac{a * n}{N} + b \right] * R_{bo} \quad (3.42)$$

Las constantes a y b vienen de:

- $a = 1,126$ y $b = -0,07$ p/ $n/N > 0,7$
- $a = 1,107$ y $b = -0,06$ p/ $n/N \leq 0,7$.

La radiación neta de onda larga se calcula de la siguiente manera:

$$R_{bo} = \left[a_1 + b_1 * (e_d)^{0.5} \right] * \left[4.903 * 10^{-9} \right] * \frac{\left[T_{\max} k^4 + T_{\min} k^4 \right]}{2} \quad (3.43)$$

$$a = 0.26 + 0.1 * e^{-[0.0154 * (30 * m + 2.25)]} \quad (3.44)$$

Donde:

- $b_1 = -0,139$
- e_d en kPa
- T_{\max} = temperatura máxima en kelvin
- T_{\min} = temperatura mínima en kelvin
- m es el número del mes (enero 1 y diciembre 12, hemisferio norte)

El flujo del suelo es:

$$G = \frac{4 * 2 * (T_{i+1} - T_{i-1})}{\Delta t} \quad (3.45)$$

Donde:

- G = flujo de calor del suelo (MJm²/día)
- T = temperatura media del aire en los días $i+1$ y $i-1$

- Dt el intervalo de tiempo entre medidas de temperatura

La expresión $K_1 = (0,622lr/P)$ de la ecuación 3.31 se puede calcular directamente por la siguiente ecuación:

$$K * \left(0.622 * \lambda * \frac{u}{P} \right) = (1710 - 6.85 * T_{med}) \quad (3.46)$$

Para la determinación de DPV_2 se utilizan las siguientes expresiones:

$$DPV = (c_{S2} - c_{D1}) \quad (3.47)$$

$$e_{S2} = \frac{e_S * (T_{max}) + e_S * (T_{min})}{2} \quad (3.48)$$

$$\quad \quad \quad (3.49)$$

siendo:

- $e_{S(Tmax)}$ = tensión de vapor en saturación a temperatura máxima
- $e_{S(Tmin)}$ = tensión de vapor en saturación a temperatura mínima

Para nuestro caso, utilizaremos el modelo Crop Evapotranspiration (FAO-56, 1998), desarrollado por la FAO mediante la aplicación del método de Penman-Monteith, el cual esta basado en la determinación de los balances de energía y el balance aerodinámico, cuya expresión final es:

$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * U_2 * (e_S - e_A)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2)} \quad (3.50)$$

Donde:

- $Eto \rightarrow$ Evapotranspiración [mm/días],
- $Rn \rightarrow$ Radiación neta en la superficie [MJ/(m²*día)]
- $G \rightarrow$ Densidad de flujo de calor del suelo [MJ/(m²*día)],
- $T \rightarrow$ Temperatura media del aire a 2 metros del suelo [°C],
- $U2 \rightarrow$ Velocidad del viento a 2 metros sobre el suelo [m/s],
- $e_s \rightarrow$ Presión de vapor de saturación [kPa],
- $e_a \rightarrow$ Presión de vapor actual [kPa],
- $e_s - e_a \rightarrow$ Déficit de presión de vapor de saturación [kPa],
- $\Delta \rightarrow$ Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa / °C],
- $\gamma \rightarrow$ Constante psicrometrica [kPa / ° C].

La evapotranspiración de referencia, ET_o proporciona un valor standard cualquiera:

- La evapotranspiración, a diferentes períodos de años, puede ser comparada con otras regiones,
- La evapotranspiración de otros cultivos puede ser relacionada.

La ecuación utiliza registros climatológicos standard de radiación solar, temperatura, humedad de aire y velocidad de viento, a nivel diario, semanal y mensual, mediante la aplicación de un análisis de regresión lineal.

Con la aplicación de cada una de estos métodos y la comparación entre ellas, se seleccionará el que mejor se ajuste al comportamiento real de la evapotranspiración en la cuenca.

Para la determinación de la evapotranspiración potencial, se utilizará la expresión siguiente:

$$ETP = K_c * ET_o \quad (3.51)$$

Donde:

- | | | |
|--------|---|----------------------------------|
| ETP | → | Evapotranspiración potencial |
| K_c | → | Coefficiente de cultivo |
| ET_o | → | Evapotranspiración de referencia |

El coeficiente de cultivo, k_c , es básicamente la relación de transformación del cultivo ET_c a la referencia ET_o , y representa una integración de los efectos de cuatro características primarias que distinguen el cultivo de la hierba de referencia. Estas características son:

- Altura del cultivo. La altura del cultivo influye en el término de resistencia aerodinámico, r_a , de la ecuación de FAO Penman-Monteith y de la transferencia turbulenta del vapor del cultivo en la atmósfera. El término r_a aparece dos veces en forma completa en la ecuación de FAO Penman-Monteith.
- Albedo (reflexión) de la superficie del cultivo-suelo. El albedo es afectado por la fracción de la tierra cubierta por la vegetación y por la humedad de la superficie del suelo. El albedo de la superficie del cultivo-suelo influye en la radiación neta de la superficie, R_n , que es la fuente primaria del intercambio de la energía para el proceso de la evaporación.
- Resistencia del pabellón (dosel). La resistencia del cultivo a la transferencia del vapor es afectada por el área de la hoja (número del stomas), edad y condición de la hoja, y el grado de

control del stomas. La resistencia dosel influye en la resistencia superficial, r_s .

- Evaporación del suelo, especialmente del suelo expuesto.

El k_c en la ecuación 3.48 predice ET_c bajo condiciones estándares. Esto representa la pérdida por evapotranspiración del cultivo y representa las condiciones donde no se pone ningunas limitaciones en el crecimiento del cultivo o evapotranspiración debido a la escasez del agua, densidad del cultivo, o enfermedad, mala hierba, insecto o las presiones de la salinidad.

El ET_c determinado por K_c se ajusta en caso de necesidad a las condiciones no estándar, $ET_{c(aj)}$, en donde cualquier condición ambiental o característica se sabe que tiene un impacto o limita a ET_c .

Los factores que influyen en la determinación del coeficiente de cultivo (K_c), son: tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, etapas de crecimiento del cultivo (etapa inicial, desarrollo del cultivo, desarrollo completo del cultivo y etapa final, tal como puede verse en la **Figura 3.1**.

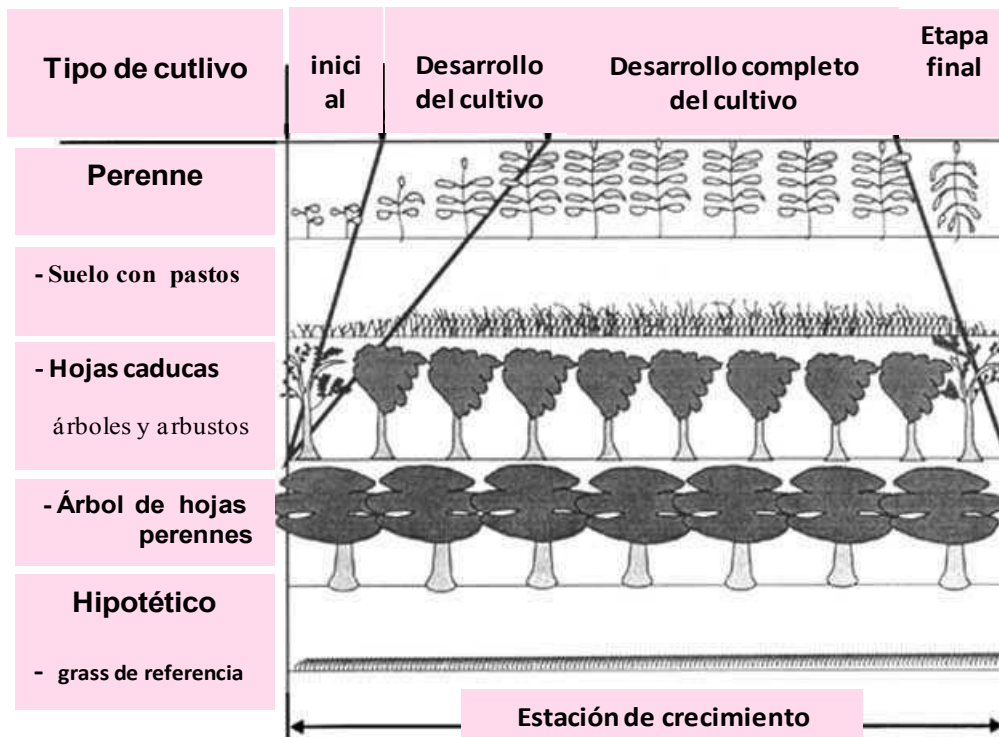


Figura 3.1. Etapas del crecimiento del cultivo para diversas especies.

Fuente: Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements
Capítulo 5 “Introducción a la evapotranspiración de cultivo (ET_c)”, FAO- 56

Los valores de K_c aumentan a medida que lo hace la superficie foliar y la cobertura del suelo por parte del cultivo, alcanzando los valores máximos cuando la cobertura alcanza el 60-80%. A medida que el cultivo avanza en su ciclo fisiológico y empieza la senescencia foliar, los valores de K_c

decrecen hasta alcanzar sus valores mínimos cuando apenas quedan hojas verdes (Itap, 2001), tal como se puede apreciar en la **Figura 3.2**.

En función a estos factores, que influyen en la determinación del valor de K_c ; se han seleccionado para los diferentes tipos de cultivos que existen en la cuenca y que se presenta en la **Tabla 3.6**, en la cual se observa los diferentes tipos de cultivos existentes en la cuenca del río Caplina, se ha considerado las 3 etapas de desarrollo (**Figura 3.2**), lo que nos da una idea general sobre el consumo de agua en cada una de las etapas.

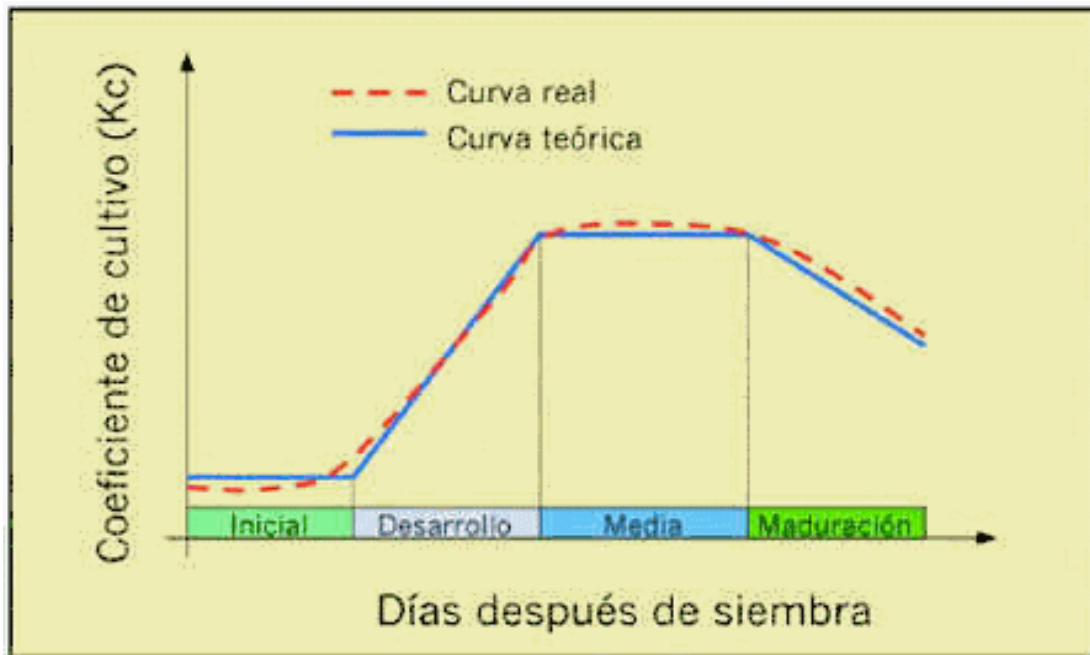


Figura 3.2. Curva real y teórica del coeficiente de cultivo K_c

Fuente: Elriego, 2001: Necesidades de agua en los cultivos

http://www.elriego.com/dom/informa_te/riego_agricola/fundamentos_riego/programacion_riegos/necesidades_agua.htm

E) Análisis del caudal y determinación de la escorrentía

• Caudal

Para el aprovechamiento del recurso hídrico, es necesario conocer en un punto dado o en la salida de la cuenca, el caudal disponible a partir de las precipitaciones. El problema es aparentemente simple en su presentación, pero de una solución en muchos casos compleja, para ello se han ideado una serie de metodologías que van desde las más simples a las más complejas, como: isocías de escorrentía, caudales específicos, generación por modelos de simulación precipitación – escorrentía, etc.

Para el período de análisis, en la vertiente se tiene información de caudales, en las estaciones HLG Puente Carratera (río Ramis), HLG

Puente Carretera (ríoHuancane), Puente Unocolla (río Cota) y en Puente Carretera (río llave), la misma que se ha tomado completada y consistenciada del estudio del “Atlas hidrológico de la veriente delTiticaca (SENAMHI, 2011).

Para cuencas con características fisiográficas, cobertura vegetal y comportamiento hidrológico similar, se puede estimar el caudal específico en función de la siguiente expresión:

$$Q_x = \frac{A_x}{A_A} * Q_A \quad (3.52)$$

Donde:

- Q_x = Caudal a estimar en la cuenca X en m^3/s
- A_x = Área de la cuenca X en Km^2
- Q_A = Caudal registrado en la cuenca A en m^3/s
- A_A = Área de la cuenca A en m^2

Para el análisis y estimación de caudales en las subcuencas se ha tenido en cuenta la ecuación 3.53, la cual se considera como la más adecuada, ya que no solo relaciona área y caudal sino que también relaciona el aporte pluviométrico de las cuencas.

$$Q_x = \frac{(A_x * P_x) * Q}{A * P} \quad (3.53)$$

Donde:

- Q_x = Caudal a estimar subcuenca en m^3/s
- A_x = Área de la subcuenca en Km^2
- P_x = Precipitación espacial sobre la subcuenca en mm
- Q = Caudal del río m^3/s .
- A = Área de la cuenca hasta la el punto hidrometrico
- P = Precipitación espacial hasta el punto hidrometrico.

▪ Escorrentía

Para el cálculo de la escorrentía anual (mm) en las subcuencas y cuenca total se utiliza la expresión matemática que relaciona el caudal y el área de drenaje.

Su fórmula es:

$$E = \frac{31,536 * Q}{A} \quad (3.54)$$

Donde:

- E = Escorrentía en mm

$$Q = \text{Caudal en m}^3/\text{s}$$

$$A = \text{Área de drenaje km}^2$$

F) Balance hídrico (BH)

El Balance Hídrico Superficial de la vertiente se realizara por cuenca y por subcuencas, a una escala temporal mensual, para lo cual se utiliza la expresión simplificada (2.2), que relaciona las variables siguientes:

$$P \rightarrow \text{Precipitación en mm.},$$

$$ET \rightarrow \text{Evapotranspiración en mm.},$$

$$Esc \rightarrow \text{Representa la salida superficial de la cuenca o aportaciones de la Red Fluvial, en mm.},$$

$$\Delta S \rightarrow \text{Cambio de almacenamiento en mm.}$$

Como el balance hídrico superficial se realizó a nivel mensual multianual, el término correspondiente al cambio de almacenamiento “ ΔS ” se considera que toma el valor de 0, debido a que la variabilidad del agua almacenada en la cuenca en períodos largos no experimenta cambios significativos.

Finalmente nuestra expresión algebraica quedo expresada por:

$$Esc_i = PP - ETC \quad (3.55)$$

▪ BHS en áreas con control hidrométrico

Para este caso se ha utilizado la siguiente expresión:

$$P = E + ETR + \delta \quad (3.56)$$

Donde:

$$P = \text{Precipitación media del período y área en mm}$$

$$E = \text{Escorrentía del período y área en mm}$$

$$ETR = \text{Evapotranspiración real media del período y área en mm}$$

$$\delta = \text{Término de discrepancia}$$

▪ BHS en áreas sin control hidrométrico

El Balance hídrico en las áreas sin control hidrométrico es determinado mediante la siguiente ecuación.

$$E = P - ETR \quad (3.57)$$

▪ BHS del lago

El lago es alimentado por los aportes de los ríos de su contorno y por las lluvias que caen directamente en su superficie y las pérdidas se deben a la evaporación y al desague superficial que sale por el río Desaguadero. Algunos autores (CARMOUZE y AQUIZE JAEN, 1981 ; LoZADA, 1985) conciben una infiltración de las aguas por el fondo del lago, la cual contribuiría a la evacuación de las sales disueltas, en complemento de la evacuación superficial por el río Desaguadero y de la sedimentación físico-química y bioquímica en el lago mismo. Sin embargo, en la orilla, las capas freáticas están en carga con relación al nivel de agua libre (GUYOT *et al.*, 1990) y así contribuyen a la alimentación del lago.

En base a dicha premisa el Balance hídrico del lago Titicaca es determinado mediante la siguiente ecuación.

$$P + Ap + AS - Ev - Qs = \Delta lago \quad (3.58)$$

Donde:

P: es la precipitación sobre el lago mismo

Ap: son los aportes de los tributarios (Ramis, llave, Huanacane, Coata e Illpa)

As: aporte subterráneo, para nuestro caso se considera cero

Ev: Evaporación

Qs: Cauadal de salidad por el río Desagaudero

$\Delta lago$: Variacion del lago

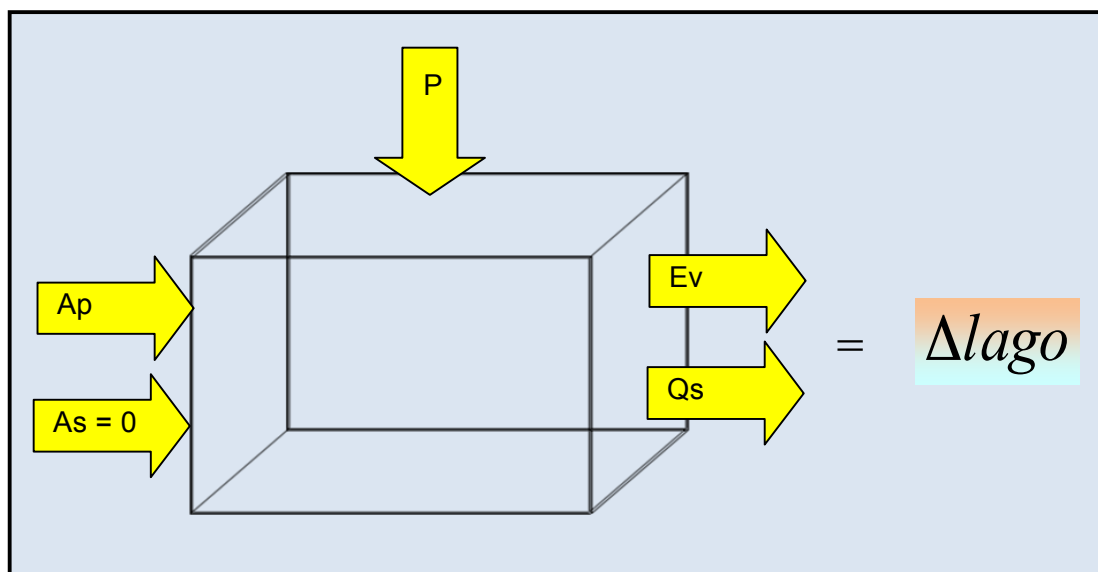


Figura 3.3. Esquematización del Balance hídrico del lago

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Determinación de los principales parámetros fisiográficos

Los parámetros se obtuvieron en base a la metodología descrita en el punto 3.2 del Capítulo III, cuyos resultados de superficie, perímetro, coeficiente de compacidad, factor de forma y lados del rectángulo equivalentes de cada una de las cuencas se muestra en la **Tabla 4.1**, apreciándose que la cuenca de mayor extensión es la del río Ramis con el 32% del área total, le siguen en orden, la cuenca de Ilave (16%), Coata (10%), Huancane (7,5%), el área restante es ocupada por cuencas como: Illpa, Suches, Callacame, espejo de agua del lago y otras cuencas y, en la **Figura 4.1**, se presenta los esquemas del rectángulo equivalente para los ríos más representativos de la región.

El rango de variación altitudinal se muestra en la **Tabla 4.2**, donde se observa que la parte más baja de la región se encuentra sobre los 3 600 msnm y la más alta sobre los 5 600 msnm (Cuencas: Ramis, Coata e Ilave), la cuenca del Suches en sus nacientes alcanza los 5400 msnm.

Los resultados de la Pendiente media del cauce (I_c), en base a la ecuación 3.6 (Capítulo III), se presenta en la **Tabla 4.3**. Asimismo la pendiente media del curso principal (S), de acuerdo al método de Taylor y Schwarz, se muestra en la **Tabla 4.4**, donde se observa que el curso con mayor pendiente es el río Callacame 0,72% y el de menor el Ramis, con 0,26%, asimismo en la **Figura 4.2**, se muestra el perfil longitudinal de los cauces más importantes.

4.1.2 Análisis de la información meteorológica e hidrológica

A.) Análisis de la precipitación

Los datos pluviométricos a nivel mensual, recopilados y automatizados, se procesaron con el fin de determinar su confiabilidad y consistencia, para lo cual se procedió a realizar los análisis siguientes:

➤ Análisis de consistencia

Del análisis de doble masa realizado para cada una de las estaciones se ha obtenido los siguientes resultados:

El período común de información utilizado en el estudio comprendió el período entre 1969 y 2010, abarcando un total de 42 años.

De las estaciones seleccionadas y en función del comportamiento pluviométrico y a su cercanía se ha seleccionado 15 grupos de estaciones para el análisis de doble masa, los cuales se muestran en la **Tabla 4.5**. En el análisis preliminar de doble masa por grupos, permitió determinar la estación patrón, las que se detallan a continuación:

Grupo N°1:	estación CO Mazo Cruz	ver Figura 4.3
Grupo N°2:	estación CO Desaguadero	ver Figura 4.4
Grupo N°3:	estación CO Laraqueri	ver Figura 4.5
Grupo N°4:	estación CO Lagunillas	ver Figura 4.6
Grupo N°5:	estación CO Pampahuta	ver Figura 4.7
Grupo N°6:	estación CP Cabanillas	ver Figura 4.8
Grupo N°7:	estación CO Puno	ver Figura 4.9
Grupo N°8:	estación CO Huaraya Moho	ver Figura 4.10
Grupo N°9:	estación CO Taraco	ver Figura 4.11
Grupo N°10:	estación CO Pucara	ver Figura 4.12
Grupo N°11:	estación CO Limbani	ver Figura 4.13
Grupo N°12:	estación CO Cuyo Cuyo	ver Figura 4.14
Grupo N°13:	estación CO Chuquibambilla	ver Figura 4.15
Grupo N°14:	estación CO Imata	ver Figura 4.16
Grupo N°15:	estación CO Challapalca	ver Figura 4.17

Con las estaciones patrones de cada grupo, se realizaron los análisis de doble masa, obteniéndose para cada estación, los siguientes resultados:

Análisis del G₁

En el periodo común evaluado (1969 – 1979), la información de este grupo, presenta buena consistencia, no siendo necesario corregir.

Análisis del G₂

La información evaluada de este en el periodo común (1990 – 2010), presenta buena consistencia, no siendo necesario corregir.

Análisis del G₃

La información del periodo (1969 – 1978) de las estaciones de este grupo, presenta buena consistencia.

Análisis del G₄

La información del periodo (1969 – 1981) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₅

La **Figura 4.18**, muestra el comportamiento de las precipitaciones totales anuales de la estación analizada, apreciándose lo siguiente:

- Paratia, en su serie histórica presenta saltos en los períodos 1979 – 1981 y 1986 - 1992, información que se corrige con la siguiente expresión:

$$P_{Paratia} = 1,2385 * P_{Pamphuta} + 216,79$$

Análisis del G₆

La **Figura 4.19**, muestra el comportamiento de las precipitaciones totales anuales de la estación analizada, apreciándose lo siguiente:

- Juliaca, en su serie histórica presenta saltos en los períodos 1976, 1977, 1982, 1983, 1996 y 1997, información que se corrige con la siguiente expresión:

$$P_{Juliaca} = 0,9467 * P_{Cabanillas} - 222,84$$

Análisis del G₇

La información del periodo (1969 – 1980) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₈

La información del periodo (1969 – 1993) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₉

La información del periodo (1969 – 2010) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₁₀

La información del periodo (1969 – 1982) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₁₁

Las **Figuras 4.20** y **4.21**, muestran el comportamiento de las precipitaciones totales anuales de las estaciones analizadas, apreciándose lo siguiente:

- Limbani, su serie histórica presenta saltos en los años 1970, 1977, 1978, información que se corrige con la expresión:

$$P_{Limbani} = 1,0367 * P_{Crucero}$$

- Macusani, presenta saltos en 1972, 1973, 1977 y 1979, información que se corrige con la expresión:

$$P_{Macusani} = 0,9421 * P_{Crucero}$$

Análisis del G₁₂

La información del periodo común (1969 – 1980) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₁₃

Las **Figuras 4.22** y **4.23**, muestran el comportamiento de las precipitaciones totales anuales de las estaciones analizadas, apreciándose lo siguiente:

- Ñuñoa, su serie histórica presenta saltos en los años 1971 y 1985, información que se corrige con la expresión:

$$P_{Ñuñoa} = 0,9415 * P_{Chuquibambilla}$$

- Orurillo, presenta saltos en 1977, 1981, 1985, 1990 y 1992, información que se corrige con la expresión:

$$P_{Orurillo} = 0,9837 * P_{Chuquibambilla}$$

Análisis del G₁₄

La información del periodo (1965 – 1978) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

Análisis del G₁₅

La información del periodo (1969 – 1989) de las estaciones de este grupo, presenta una consistencia buena.

➤ **Completar y/o utilizar información para su extensión**

Debido a que algunas estaciones presentan su registro histórico incompleto (1969 – 2010), fue necesario realizar el completado de los datos faltantes mediante un análisis de correlación, obteniéndose lo siguiente:

Análisis del G₁

La **Figura 4.24**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar o extender (Pizacoma), donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Pizacoma} = 1,2339 * P_{Mazo-Cruz} - 0.7049$$

Análisis del G₂

Las **Figuras 4.25** y **4.26**, muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Tahauco Yunguyo es Isla Suana), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Yunguyo} = 1,1051 * P_{Desaguadero} - 286,81$$

$$P_{Isla-Suana} = 1,2009 * P_{Desaguadero} + 113,91$$

Análisis del G₃

La **Figura 4.27** y **4.28**, muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Juli e llave), donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Juli} = 1,2057 * P_{Laraqueri} + 64.895$$

$$P_{llave} = 0,9399 * P_{Laraqueri} + 245,14$$

Análisis del G₄

La **Figura 4.29**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar o extender Hda. Colini, donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Hda.Colini} = 1,121 * P_{Lagunillas} - 252,31$$

Análisis del G₅

Las **Figuras 4.30, 4.31 y 4.32** muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Quillisani, Paratia y Jarpana), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Quilliani} = 1,0866P_{Pampahuta} + 31,248$$

$$P_{Paratia} = 1,2583P_{Pampahuta} - 77,526$$

$$P_{Jarpana} = 0,9865P_{Pampahuta} + 126,96$$

Análisis del G₆

Las **Figuras 4.33 y 4.34** muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Mañazo y Juliaca), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Mañazo} = 1,0802P_{Cabanillas} + 173,91$$

$$P_{Juliaca} = 0,9267P_{Cabanillas} - 48,241$$

Análisis del G₇

Las **Figuras 4.35, 4.36 y 4.37** muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Umayo, Los Uros y Capachica), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Umayo} = 0,9429P_{Puno} - 361,1$$

$$P_{Los-Uros} = 0,9661P_{Puno} + 429,61$$

$$P_{Capachica} = 1,0014P_{Puno} - 67,67$$

Análisis del G₈

La **Figuras 4.38** muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar (Conima), donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Conima} = 0,9684 * P_{Moho} + 350,51$$

Análisis del G₉

Para el periodo de análisis (1969 – 2010), las estaciones de este grupo cuentan con información completa y consistente.

Análisis del G₁₀

La **Figura 4.39**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar o extender Azangaro, donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Azangaro} = 0,7428 * P_{Pucara} + 273,76$$

Análisis del G₁₁

Las **Figuras 4.40** y **4.41** muestran el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar (Macusani y Ollachea), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Macusani} = 0,9371P_{Crucero} + 113,32$$

$$P_{Ollachea} = 1,5101P_{Crucero} - 302,86$$

Análisis del G₁₂

La **Figura 4.42**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar o extender Cuyo Cuyo, donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Cuyi-Cuyo} = 1,2348 * P_{Ananea} - 152,55$$

Análisis del G₁₃

Las **Figuras 4.43**, **4.44**, **4.45** y **4.46**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y las estaciones a completar o extender (Ñuñoa, Orurrillo, Santa Rosa y Llally), donde se ha obtenido las expresiones algebraicas siguientes:

$$P_{Ñuñoa} = 0,9497 * P_{Chuquibambilla}$$

$$P_{Orurrillo} = 0,9666 * P_{Chuquibambilla} + 228,77$$

$$P_{Sta.Rosa} = 1,6217 * P_{Chuquibambilla} - 16,399$$

$$P_{Llally} = 1,1937 * P_{Chuquibambilla} - 199,72$$

Análisis del G₁₄

La **Figura 4.47**, muestra el análisis de correlación entre la estación patrón y la estación a completar o extender (Pañe), donde se ha obtenido la expresión algebraica siguiente:

$$P_{Pañe} = 1,2385 * P_{Imata} - 147,5$$

Análisis del G₁₅

Las estaciones de este grupo, cuentan con información completa y consistente para el periodo evaluado (1969 – 2010).

- **Estimación de la precipitación media areal**

Con el Software Hydraces se generó cuadrículas o el grillado se realizó en cuadrículas cada 10 km por lado, generándose 1 377 intersecciones (**Mapa Grillado**), donde se ha generado información, por los métodos de Thiessen, Inverso a la Distancia y Kriging y, cuyo valor en el punto (estación virtual) es el promedio de los valores obtenidos por los métodos mencionados.

En la **Tabla 4.6**, se muestra los resultados de las precipitaciones areales mensuales, asimismo en los mapas Pmed del 01 al 13 se muestra la distribución espacial de las precipitaciones en toda la cuenca de estudio.

B) Análisis de temperatura

El análisis de consistencia de la información de temperatura no fue necesario realizarlo en vista que la variabilidad espacial y temporal de esta variable se mantiene en el área de estudio, tal como se puede observar en las **Figuras 4.48 y 4.49**, donde se aprecia que el comportamiento de la temperatura máxima y mínima es uniforme y homogéneo.

Las variables climatológicas, por lo general no presentan variaciones considerables a través del tiempo, sin embargo con el fin de poder uniformizar la serie de datos de cada una de las estaciones; se realizó un análisis de extensión de los datos de temperatura a nivel medio, máximo y mínimo. Las estaciones con información de temperatura en función a su comportamiento y cercanía, obteniéndose 12 grupos (**Tabla 4.7**).

En las **Figuras 4.50 al 4.72**, se presentan los resultados obtenidos de los análisis de correlación lineal de las temperaturas (mínimo y máximo), observándose en cada una de ellas un ajuste significativo lo cual nos permitirá extender las series originales hasta el período considerado para el análisis (1969/2010), cuyas expresiones son:

- Temperaturas máximas ($T_{m\acute{a}x}$):

Análisis del G₁

$$TMax_{Capazo} = 0,8201 * TMCruz - 1,2854$$

$$TMax_{Pizacoma} = 1,0733 * TMCruz - 2,9204$$

Análisis del G₂

$$TMax_{Yunguyo} = 0,9862 * TDesaguadero - 0,7433$$

$$TMax_{Isla-Suana} = 0,9734 * TDesaguadero + 0,979$$

Análisis del G₃

$$TMax_{Ilave} = 1,0868 * TJuli + 2,5149$$

$$TMax_{Laraqueri} = 1,1621 * TJuli + 0,6609$$

Análisis del G₄

$$TMax_{Lagunillas} = 0,0002 * TPampahuta^2 + 0,9464 * TPampahuta + 7,9296$$

Análisis del G₅

$$TMax_{Juliaca} = 1,0521 * TCabanillas - 0,6347$$

$$TMax_{Mañazo} = 1,0036 * TCabanillas - 1,1057$$

Análisis del G₆

$$TMax_{Capachica} = 0,9518 * TPuno + 2,9422$$

$$TMax_{Isla-Taquile} = 0,9273 * TPuno + 2,703$$

Análisis del G₇

$$TMax_{Cojata} = 0,8466 * TMoho - 1,3168$$

$$TMax_{Isla-Soto} = 1,0052 * TMoho - 0,5174$$

Análisis del G₈

$$TMax_{Taraco} = 0,967 * TArapa - 2,6429$$

Análisis del G₉

$$TMax_{Pucara} = 1,0085 * TAzangaro - 1,0638$$

$$TMax_{Muñani} = 0,9789 * TAzangaro - 2,6625$$

Análisis del G₁₀

$$TMax_{Cnucero} = 0,5616 * TTambopata - 2,2607$$

$$TMax_{Macusani} = 0,4436 * TTambopata - 0,5133$$

$$TMax_{Olachea} = 0,658 * TTambopata - 1,7939$$

Análisis del G₁₁

$$TMax_{Lally} = 0,4436 * TChuquibambilla - 1,1482$$

Análisis del G₁₂

$$TMax_{Pañe} = 0,8558 * TImata + 0,9908$$

Análisis del G₁₃

$$TMax_{Carumas} = 1,0344 * TUbina - 0,9098$$

- Temperaturas mínima (TTmín):

Análisis del G₁

$$TMin_{Capazo} = 0,9946 * TMCruz - 0,2861$$

Análisis del G₂

La temperatura mínima de Isla Suana para el período 1969 – 1990, se estimó en base a la ecuación 4.1.

Análisis del G₃

En este grupo, la temperatura mínima de Larqueri para el período 1969 – 1990, también se estimó en base a la ecuación 4.1.

Análisis del G₄

$$TMin_{Lagunillas} = 0,0001 * (T \text{ min_ Pam})^2 + 0,310 * T \text{ min_ Pam} - 0,4668$$

Análisis del G₅

La temperatura mínima de Juliaca para el período 1996 – 2007, se estimo en base a la ecuación 4.1.

Análisis del G₆

$$TMin_{Capachica} = 0,0033 * (T \text{ min Puno})^2 + 0,412 * T \text{ min_ Pun} + 0,2122$$

$$TMin_{Isla-Taquile} = 1,9101 * TPuno - 1,3149$$

Análisis del G₇

$$TMin_{Cojata} = 2,8255 * T \text{ min Moho} - 8,48$$

$$TMin_{Cojata} = -1,421 * T \text{ min Moho} - 6,9085$$

Análisis del G₈

En este grupo, la temperatura mínima de Taraco para el período 1969 – 1991, también se estimo en base a la ecuación 4.1.

Análisis del G₉

$$TMin_{Muñani} = 1,2919 * T \text{ min Azangaro}$$

Análisis del G₁₀

$$TMin_{Crucero} = 0,1444 * T \text{ min_ Tamb} - 0,8804$$

$$TMin_{Macusani} = 0,112 * T \text{ min_ Tamb} - 0,2748$$

Análisis del G₁₁

$$TMin_{Llaly} = 0,7909 * T \text{ min Chuquibambilla} + 2,858$$

Análisis del G₁₂

$$TMin_{Pañe} = 0,6014 * T \text{ min Imata} + 0,252$$

Análisis del G₁₃

$$TMin_{Carumas} = 1,0344 * T \min Ubinas + 0,9098$$

Análisis del G₁₄

$$TMin_{lag_Suches} = 1,8008 * T \min Tacalaya + 18,301$$

Las temperaturas media (TTmed), en algunas de las estaciones con escasa información, se determinó con la expresión siguiente:

$$TT_{media} = \frac{(TT_{MAXIMAA} + TT_{MINIMA})}{2} \quad (4.1)$$

Los resultados obtenidos mediante esta expresión fueron comparados con los datos de temperaturas medias registradas en algunas estaciones, no encontrándose diferencias significativas en los valores; razón por la cual se toma la expresión (4.1) como confiable y representativa para dicha variable.

Consistenciada, extendida, completada y generada la información de temperatura para cada una de las estaciones seleccionadas, se procedió a procesar dicha información con el software Hydracces.

- **A nivel mensual**

Variable que se procesa de forma similar que la variable precipitación. Con el Software Hydracces se generó el grillado en cuadrículas cada 10 km por lado, generándose 1 377 intersecciones (Mapa grillado), donde se realiza la generación de temperaturas mínimas, máximas y medias en los vértices de cada grilla.

Obtenida la información en cada punto de la grilla, se procede a elaborar los **Mapas Tmed 01 al 13, Tmin 01 al 13 y en Tmax 01 al 13**, donde se muestra la distribución espacial mensual de las temperaturas medias, mínimas y máximas en toda la cuenca de estudio, donde se observa lo siguiente:

Temperatura Media: el régimen de temperatura media en la vertiente se caracteriza por presentar valores que fluctúan entre 6,0 °C y 12,0 °C. Las mayores ocurren en la zona circunlacustre del lago

Titicaca y sobre el lago mismo; las menores se presentan en parte zonas ubicadas sobre los 4 000 msnm.

La temperatura promedio anual en la cuenca es de 10,0°C.

Temperatura Máxima: los Mapas T_{máx} del 01 al 13, muestran la distribución espacial del régimen de temperaturas máximas multianual a nivel espacial, con valores que fluctúan entre 10,0°C y 18,0 °C.

La temperatura máxima promedio en la cuenca es de 15,0°C.

Temperatura Mínima: en la cuenca de estudio, el régimen de temperaturas mínimas multianual a nivel espacial fluctúa entre 0,0 °C y 6,0 °C.

La temperatura mínima promedio en la cuenca es de 3,0°C.

C) Análisis de humedad relativa, viento y horas de sol

• Humedad relativa

De la información de humedad relativa seleccionada, procesada y analizada, se ha determinado que el régimen a nivel temporal y espacial; presenta un comportamiento variable en su distribución tal como se puede observar en la **Figura 4.73**, sin embargo dicha información es representativa y característica de la zona.

En dicha Figura se puede apreciar que el régimen de la humedad relativa presenta dos comportamientos, uno de ellos, que se presenta en el periodo mayo – noviembre, donde ocurren los valores mas bajos, siendo el promedio de 59,3% y, el siguiente que se presenta entre noviembre – abril, donde alcanza sus mayores valores, cuyo promedio es de 70,3%.

La zona con mayores valores se encuentra en las nacientes de la cuenca del río Ramis (Ollachea, Macusani, Limbani), donde la humedad alcanza valores del 85%, este comportamiento se debería a la presencia de mayores flujos de humedad provenientes de la amazonia y a la presencia de vegetación.

La humedad relativa en general es baja en toda la vertiente. El promedio anual en toda la región es del 60%, si bien ella varía desde 44% y 88%. A nivel diario, en general, la humedad relativa tiene un comportamiento inverso a la temperatura, baja al comienzo de la tarde y más elevada en la noche.

Para su análisis las estaciones con valores de humedad de relativa (**Tabla 3.3**) se agruparon de la siguiente manera:

Grupo 1: Cabanillas – Huancane – Huaraya Moho - Capachica.

Grupo 2: Lagunillas – Lampa – Pampahuta

Grupo 3: Pizacoma – Mazo Cruz

Grupo 4: Puno – Tahuaco Yunguyo – Ilave – Juli

Grupo 5: Chuquibambilla – Progreso – Muñani – Ollache – Llally – Macusani – Ayaviri – Azangaro – Arapa.

Grupo 6: Tarata – Carumas – Ubinas - Omate.

Grupo 7: Chuapalca – Vilacota – Candarave.

Los análisis de correlación se presentan en las **Figuras del 4.74 al 4.80**.

Con la información consistenciada y completada se procede a interpolar para generar información en cada punto de la grilla (10x 10 km), seguidamente se elaboran los **Mapas HR med 01 al 13**, que muestra la distribución mensual de la humedad relativa a nivel espacial en la vertiente, donde se observa de manera general esta variable aumenta con la altitud, la humedad relativa media anual en el contorno del lago varía de 50 a 65 %, los valores decrecen al sur de la vertiente, con valores de 45 a 50 %. La variación anual sigue la de las precipitaciones, con un máximo en enero o febrero, y un mínimo en julio. Hacia la selva Puñena (Sandía, San Gaban) los valores superan el 70%.

• **Velocidad del viento**

El régimen eólico, presenta un comportamiento variable en su distribución temporal y espacial; tal como se observa en la **Figura 4.81**, donde se muestra las fluctuaciones de la velocidad de viento a nivel mensual, y en función a la ubicación de la estación; se aprecia dos comportamientos, uno donde ocurren los valores máximos de velocidad que en promedio alcanza los 2,66 m/s, que se presenta entre julio – diciembre de cada año y; entre enero – junio se presentan los menores valores, con una media de 2,26 m/s.

Los valores máximos oscilan entre 3,9 m/s y 5,5 m/s, los que se presentan con mayor frecuencia al sur de la vertiente (Pizacoma, Desaguadero, etc); los valores mínimos oscilan entre 1,1 m/s y 1,5 m/s, los que se presentan hacia la parte central de la vertiente, sobre los 3 900 msnm de altitud por la zona de la cuenca de los ríos Coata e Illpa (Cabanillas, Ichuña).

En la vertiente, los vientos son principalmente el resultado de los patrones locales de relieve, generalmente perturbados por brisas locales, los cuales tienden a canalizar los vientos en direcciones específicas. En la zona del lago Titicaca se genera además una circulación lago-tierra-lago, resultado de las diferencias de temperatura entre la tierra y la superficie acuática (INADE, 2002)

Durante el día, los vientos soplan del lago hacia las riberas, debido a que la tierra se calienta más que el lago, generándose así una zona de más baja presión sobre la primera. Durante la noche se invierte la circulación, debido a que la tierra se enfría más que el lago.

En cuanto a la velocidad y dirección del viento la situación es muy parecida a lo largo del año:

- ✓ En el norte (cabeceras de los ríos Coata y Ramis) predominan las calmas, frecuentemente por encima del 50% del tiempo, salvo en Pampahuta y Llally, donde los vientos predominantes son del S y SO (en Llally la velocidad puede llegar hasta 4.8 m/s). No obstante, en los meses de invierno la velocidad del viento tiende a ser mayor que las velocidades de verano.
- ✓ En la zona del lago Titicaca los vientos predominantes vienen del lago, con velocidades entre 1,5 y 4 m/s, aunque las calmas pueden alcanzar localmente valores bastantes altos.

En el oriente predominan los vientos de los cuadrantes del Este (E, NE y SE), con velocidades entre 3 y 5 m/s, aunque las calmas pueden alcanzar porcentajes altos en algunas localidades.

La información analizada es representativa de cada una de las zonas y por ende podemos decir que es homogénea, para el área de estudio planteado. Si bien es cierto, la geomorfología y relieve superficial de las cuencas no son del todo similares, se ha obtenido que la diferencia entre las fases consideradas no sea significativa, por lo cual se presenta el análisis regional.

Con la información de velocidad de viento y con el apoyo del software Hydraccess, se generó información en cada uno de los puntos de la grilla, seguidamente se realizó la interpolación y suavización se realizó en ArcGis, obteniéndose los **Mapas Vmed del 01 al 13**, que muestran la distribución de dicha variable a nivel espacial en la zona de estudio.

• **Horas de sol**

Del análisis realizado para esta variable, se ha determinado que la distribución de las horas de sol a nivel espacial y temporal, registra un comportamiento variable; caracterizándose por presentar en promedio, valores altos durante los meses de enero, febrero y marzo, para altitudes bajas; mientras que para mayores altitudes, el comportamiento es inverso, tal como se observa en la **Figura 4.82**

La información aquí analizada es representativa y homogénea de la zona en estudio caracterizando el régimen de horas de sol.

La caracterización de esta variable en la cuenca de estudio, se ha realizado en base al grillado de 10 x 10 km construido para analizar las variables de precipitación, en que, cada punto nos sirve para generar información con apoyo

del Hydracces, luego se procede a la interpolación de dichos valores, para luego elaborar los **Mapas de Hsmed del 01 al 13**. De manera general se observa que en la proximidad del lago los valores son de 250 horas/mes (Puno), los valores mínimos ocurren en enero o febrero con un valor promedio de 173 horas/mes, mientras que los valores máximos se presentan entre julio y/o agosto (invierno) con un valor medio de 295 horas/mes.

D) Determinación de la evaporación

La información de evaporación de tanque recopilada y analizada a nivel regional, ha permitido caracterizar el comportamiento de la pérdida de agua desde superficies libres tales como: lagos, embalses, superficie de suelo, río, superficies de las hojas de los árboles, etc.

El régimen de evaporación de agua, para la zona de estudio registra un comportamiento variable en la distribución espacial y temporal, tal como se puede apreciar en la **Figura 4.83**, donde se observa:

- A nivel espacial, los mayores valores se presentan sobre el espejo de agua del lago mismo y decrecen a medida que se aleja del mismo. Los menores valores se presentan hacia la zona de la amazonia (Macusani, Crucero).
- A nivel temporal, la mayor evaporación se registra en el período setiembre – enero, con una media de 144 mm/mes y los menores en el período febrero – noviembre con una media de 127 mm/mes.

Esta variable, también se ha analizado en base al grillado construido de 10 x 10 km, donde con apoyo del Hydracces se generaron los valores en cada punto de la grilla, se realiza la interpolación, procediendo luego a la elaboración de los **Mapas de Emed del 01 al 13**, que muestran la distribución de la evaporación a nivel espacial en la cuenca de estudio; cuyo comportamiento anual (**Mapa Emed 13**), que se caracteriza por presentar valores más altos sobre el espejo de agua del lago.

La evaporación promedio mensual en la cuenca es de 146,3 mm/mes.

E) Determinación de la evapotranspiración

Para la determinación de la evapotranspiración potencial y real, se utilizó el método de Penman-Monteith, el cual a dado muy buenos resultados en los Balances Hídricos Superficiales desarrollados para las cuencas del sur del país, como: Chala, Chili, Camana, Ocoña, Caraveli, Tambo, Caplina, Locumba, Sama entre y otras.

• **FAO – PMOND1**

Macro desarrollada por la FAO, para la determinación de los valores de la evapotranspiración de referencia (ET_o), en función de la ecuación de Penman – Monteith, la cual es recomendada como la más representativa para la determinación de esta variable, por reunir en su expresión matemática las principales variables que directamente influyen en la pérdida de agua hacia la atmósfera.

Los resultados obtenidos de la aplicación de esta macro a cada una de las estaciones seleccionadas, se presenta en la **Tabla 4.9**, donde se puede observar que la E_{to} varía entre 1090 mm/año y 1450 mm/año, asimismo no parece existir una relación directa entre la ET_o y la Altitud, asimismo en la **Figura 4.84**, se muestra el comportamiento mensual de cada una de las estaciones, donde se observa que esta variable presenta dos comportamientos, uno de ellos se presenta entre setiembre – marzo, donde ocurren los mayores valores, los que oscilan entre 100,0 mm/mes a 127,0 mm/mes, con una media de 115,0 mm/mes y, entre abril – agosto, se presentan los menores valores, que varían entre 80,0 mm/mes y 99,0 mm/mes, con un valor promedio de 90,6 mm/mes.

Como una manera de comprobar los resultados obtenidos mediante la aplicación de la macro antes descrita, se aplicó el programa desarrollado por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), IIDS (Institute of Irrigation and Development Studies), Khaled El – Askari y NWRC (National Water Research Center) y que lleva por nombre CropWat.

Dicho software, utiliza el método de FAO (1992) Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia, utilizando la metodología de Penman-Monteith la cual fue descrita en el Capítulo 3 y que también es utilizado en las versiones 5,7 y 7,0 de CROPWAT.

El programa fue aplicado a cada una de las estaciones, cuyos resultados se pueden apreciar en las **Tablas 4.10 a 4.33**, que fueron corroborados con los cálculos realizados mediante la macro.

Fernández et al, 2001, en el trabajo de investigación sobre las necesidades de agua de los cultivos bajo invernadero, cuantificó las pérdidas y requerimiento de agua de los cultivos mediante tres métodos: Medida del contenido de agua en el suelo, Medida del estado hídrico de la planta y Medida de parámetros climáticos, utilizando en cada uno de los casos instrumentos calibrados, así como también mediante expresiones matemáticas desarrolladas: Penman – FAO, Radiación – FAO, Hargreaves y FAO-Tanque, obteniendo como resultado la **Figura 4.85**, donde se aprecia que el método que mejor se ajusta al comportamiento real de la

evapotranspiración es el de Penman – FAO (Monteith), que estaría corroborando los resultados obtenidos para la zona de estudio.

- **A nivel mensual**

Esta variable se procesa y analiza de manera similar que las mencionadas anteriormente. Con el Hydracces se ha construido una grilla de 10 Km por lado, generándose 1 377 intersecciones (Maoa grillado), donde se realiza la generación de la Eto, en cada una de las intersecciones por los métodos de Inverso a la distancia, Thiessen y Kriging, donde el promedio de dichos métodos, es el valor de la Eto en dicho punto, este proceso se realiza para cada mes y para el valor anual.

Determinados los valores de la ETo, en cada punto de la grilla, se elaboró los **Mapas de ETo 01 al ETo 13**, donde se muestra el comportamiento mensual y anual de esta variable en la cuenca en estudio. De la Tabla 4.9, se observa que los valores extremos oscilan entre 64,6 mm/mes y 153,5 mm/mes, presentando los valores mínimos en invierno (junio o julio) y los máximos en verano (diciembre a marzo), de cada año respectivamente. Asimismo los mayores valores se presentan en la zona de Pizacoma, donde la media mensual es de 118,9 mm/mes y los mas bajos ocurren en Yunguyo, donde la media es de 91,4 mm/mes.

El valor medio anual de la evapotranspiración de referencia (ETo) en toda la vertiente es de 1 258 mm/.año

- **Kc**

El segundo paso es conocer la evapotranspiración del cultivo, para lo cual se analizó y determinó el valor de Kc más representativo para cada una de las zonas caracterizada por la estación meteorológica seleccionada.

En la **Tabla 4.34**, se presentan los tipos de cultivos más importantes ubicados en la región del Titicaca, obteniéndose para cada una de las estaciones un valor promedio del coeficiente de cultivo (Kc), en función del tipo de cultivo y estado fenológico.

Con el fin de darle al presente análisis una respuesta más real, se consideró para cada estación los diferentes tipos de cultivos más representativos que hay en la zona.

Con los valores promedio del Kc y con la **ecuación 3.52** se obtiene la Evapotranspiración de cultivo (Etc) para cada una de las estaciones a nivel mensual.

• Estimación de la evapotranspiración areal

Con los valores obtenidos de ETo y Kc para cada estación se calcularon los valores de ETc a nivel mensual y, con el apoyo del Hydraccess se estimó la Etc para cada punto de la grilla (1377 intersecciones). Valores con los cuales se realizó la interpolación y elaborar los **Mapas ETc 01 al 13**, donde se muestra la variación espacial de esta variable.

Con la ayuda del SIG, se determinó las áreas entre isolíneas de evapotranspiración, obteniéndose los valores medios areales.

En esta región la ETc presenta dos ciclos o períodos diferenciado, alcanzando sus mayores en el periodo octubre – enero con un valor medio de 90,7 mm/mes y, en la cuenca del río Illpa alcanza el mayor valor con 99,3 mm/mes en el mes de noviembre; los menores valores se presentan entre febrero y noviembre con un valor medio de 71,3 mm/mes, siendo junio donde ocurren los menores valores del año.

En la cuenca del Coata se presentan los menores valores de esta variable y en la cuenca de río llave se presentan los mayores valores. A nivel medio mensual la Etc oscila entre 59,2 mm/mes y 102,2 mm/mes.

En la **Tabla 4,35**, se muestra los resultados del análisis areal de la evapotranspiración media mensual.

F) Estimación del caudal y escorrentía

En la zona de estudio se tiene información de caudales de las estaciones HLG Puente Carretera – Ramis, Puente Carretera – Huancane, Puente Unocolla – Coata y Puente Carretera – llava, la cual ha sido tomada completada y consistenciada del estudio “Atlas Hidrológico de la cuenca de la región Titicaca (Senamhi – DGH, 2011). La información corresponde a los cuatro ríos principales que aportan en conjunto el 96% de los recursos hídricos a la zona evaluada.

Los caudales del río Desaguadero, medidos en Puente Internacional, presentan información para el período 1957 – 1997, de donde se ha tomado el promedio de dicha serie, con la finalidad de conocer las salidas y/o aportes del Titicaca hacia el lago Poopò (Bolivia), considerando dichos valores para el período de análisis.

En la **Figura 4.86**, se muestra el análisis de doble masa para las estaciones mencionadas y en la **Figura 4.87**, la variabilidad mensual de los caudales para todo el período evaluado y en la **Figura 4.88 y Figura 4.89** se muestra el comportamiento mensual en las cuencas de los ríos Ramis, Huancane, Coata, llave y Desaguadero, cuyos módulos multianuales son:

$$\overline{QPuente - Carretera - Ramis} = 76,5m^3 / s$$

$$\overline{QPuente - Carretera - Huancane} = 18,95m^3 / s$$

$$\overline{QPuente - Unocolla - Coata} = 41,5m^3 / s$$

$$\overline{QPuente - Carretera - Ilave} = 35,6m^3 / s$$

$$\overline{QPuente - Internacional - Desaguadero} = 27,6m^3 / s$$

Los caudales medios mensuales de las subcuencas, se determinaron en base a la ecuación 3.52 y a la información de caudales mensuales de la estación principal de la cuenca y, para el caso de las cuencas de Illpa, Suches y Ccallaccame que no cuentan con estación de control, se ha tomado como referencia las estaciones de cuencas vecinas como Coata, Huancane e Ilave, respectivamente, valores que se muestran en la **Tabla 4.36**.

- **Escorrentía**

Con los valores de caudales se ha determinado la escorrentía para el área de estudio, cuyos valores se muestran en la **Tabla 4.37**.

4.1.3 Determinación del Balance hídrico (BHS)

La disponibilidad de agua en el suelo es un factor mucho más importante en el medio que la precipitación en si misma, pues gran parte de ella se pierde de diferentes maneras y de forma no aprovechable.

Para determinar el balance hídrico en la cuenca de estudio, se utilizará la ecuación matemática 3.56 que relaciona las variables de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento superficial.

- **BHS en áreas sin control hidrométrico**

El Balance Hídrico superficial en las áreas sin control hidrométrico es determinada mediante la siguiente ecuación.

$$E = P - ETR$$

Reemplazando valores, de precipitación y evapotranspiración, obtenemos el escurrimiento medio areal en las subcuencas y cuencas de la vertiente, tal como se muestra en la Tabla 4.38, asimismo en los los **Mapas Esc 01 al 12**, se presenta el comportamiento y distribución del escurrimiento superficial.

- ❖ **Cuenca del río Suches**

Esta cuenca en territorio Peruano, presenta dos periodos, uno que ocurre entre diciembre – marzo, donde el superávit promedio mensual es de 49,0 mm/mes y el

otro deficitario que se ocurre entre abril – noviembre de cada año, con un déficit promedio mensual es de 39,4 mm/mes. El comportamiento y distribución del escurrimiento medio areal se presenta en los **Mapas Esc 01 al 12**. A nivel anual en la subcuenca se registra un déficit acumulado de:

$$Esc_{.Suches} = -118,3mm$$

❖ **Cuenca del río Ccallaccame**

Cuenca que presenta dos comportamientos, uno de superávit que ocurre de enero a marzo con exceso de agua promedio mensual de 62,9 mm/mes y, otro deficitario que se presenta entre abril y diciembre, con un déficit promedio mensual de 50,4 mm/mes. A nivel anual existe un déficit promedio de:

$$Esc_{Ccallaccame} = -265,3mm$$

❖ **Cuenca del río Illpa**

Cuenca, cuyo régimen hidrológico presenta dos comportamientos, uno de ellos ocurre entre diciembre y marzo, con un superávit promedio de 44,0 mm/mes y el otro deficitario que se presenta de abril a noviembre, donde el déficit promedio mensual es de 58,5 mm/mes. En la cuenca se ha determinado que a nivel anual existe un déficit promedio de:

$$Esc_{.Illpa} = -292,8mm$$

• **BHS en áreas con control hidrométrico**

❖ **Río Ramis –Puente Carretera Ramis:**

La cuenca del río Ramis, hasta este punto de control presenta un régimen hidrológico similar a las cuencas descritas anteriormente, es decir, con dos comportamientos, uno deficitario que ocurre entre abril –noviembre, con un déficit promedio mensual de 39,8 mm/mes y el otro que se presenta de diciembre a marzo, con un superávit promedio mensual de 68,5 mm/mes.

A nivel estacional, los mayores déficit se presentan en julio con 56,7 mm/mes y el mayor superávit se da en enero con 100,8mm/mes. A nivel anual se presenta un déficit acumulado de:

$$Esc_{.Pte.Carretera-Ramis} = -111,6mm$$

❖ **Cuenca del río Huancane – Puente Carretera Huancane:**

El régimen hidrológico es muy similar a las cuencas descritas, con dos comportamientos, uno deficitario que ocurre entre abril –noviembre, con un déficit promedio mensual de 46,3 mm/mes y otro que se presenta de diciembre a marzo, con un superávit promedio mensual de 60,9 mm/mes.

A nivel estacional, el mayor déficit se presenta en agosto con 60,9 mm/mes y el mayor superávit se da en enero con 79,3mm/mes. A nivel anual se presenta un déficit acumulado de:

$$Esc_{Pte.Carretera-Huancane} = -219,2mm$$

❖ **Cuenca del río llave – Puente Carretera llave:**

Con un régimen hidrológico muy similar a los anteriores, un comportamiento deficitario que ocurre entre abril – diciembre, con un déficit promedio mensual de 52,7 mm/mes y otro de exceso de agua que se presenta de enero a marzo, con un superávit promedio mensual de 54,7 mm/mes.

A nivel estacional, el mayor déficit se presenta en octubre con 71,6 mm/mes y el mayor superávit se da en enero con 75,9mm/mes. A nivel anual se presenta un déficit acumulado de:

$$Esc_{Pte.Carretera-llave} = -310,1mm$$

❖ **Cuenca del río Coata – Puente Unocolla:**

El régimen hidrológico es similar a los descritos, un comportamiento deficitario que ocurre entre abril – noviembre, con un déficit promedio mensual de 49,7 mm/mes y otro de exceso de agua que se presenta de diciembre a marzo, con un superávit promedio mensual de 67,1 mm/mes.

A nivel estacional, el mayor déficit se presenta en agosto con 62,5 mm/mes y el mayor superávit se da en enero con 99,6 mm/mes. A nivel anual se presenta un déficit acumulado de:

$$Esc_{Pte.Unocolla} = -129,4mm$$

❖ **Balance del lago Titicaca:**

El balance del lago Titicaca se ha esquematizado en la **Figura 3.3** y su expresión matemática se presenta por la **ecuación 3.58**. Para el balance solo se ha tendido en cuenta los aportes de caudales de la parte Peruanam habiéndose considerado

además de los cuatro ríos importantes (Ramis, llave, Huancane y Coata) al río Illpa}.

Asimismo los aportes subterráneos se ha considerado inexistentes es decir cero, con estas premisas, el balance del lago se presenta en la **Tabla 4.38** y su representación grafica en la **Figura 4.97**.

El comportamiento del lago responde al comportamiento de los ríos (aportes), tal como se observa en la Tabla 4.38 la evaporación media areal sobre el lago es casi constante, la que varia a nivel mensual de 131,30 mm/mes (febrero) a 157,0 mm/mes (diciembre); asimismo la lamina de agua que sale por el río Desaguadero, varia de 9,44 mm (diciembre) a 24,18 mm (abril) y, responde a un manejo ya después del período de avenidas (diciembre marzo), el período de mayor extracción de agua del lago se da entre marzo – mayo, con una lamina media mensual de 22,8 mm/mes. (**Figura 4.89**).

Entonces, el lago tiene una fase de ascenso de niveles de agua que se presenta en el período diciembre – abril, acumulando en dicho período un incremento de 801,70 mm y, otra fase de descenso que se presenta de mayo a noviembre con un descenso acumulado de 808,9 mm, es decir existe un equilibrio entre ambas fases.

Asimismo comparando con los niveles de agua del lago de la estación Muelle Enafer en Puno, se observa un diferencial entre el balance y los niveles de agua, lo cual ocurre ya que, para el estudio solo se ha considerado la parte Peruana, considerando que el lago tiene aportes de otros ríos del lado Boliviano y también la estimación de la evaporación solo se considera el lado de Perú.

Los aportes por las lluvias representa el 48% al lago, los aportes por escurriemiento de los ríos es el 52%, asimismo del total de las perdidas de agua del lago la evaporación representa el 90%, las salidas por el río Desagaudero son el 9% y otros el 1%

En los **Mapas Esc 01 al 12**, se presenta el comportamiento y distribución del escurriemiento superficial en la vertiente, apreciándose que los mayores déficit ocurren entre el período junio y setiembre, siendo agosto y setiembre los más deficitarios donde los valores de las isolineas fluctúan entre – 80 mm a 60 mm (**Mapa Esc 08 y 09**) y los mayores valores se presentan en enero con valores de 20 mm a + 260 mm (**Mapa Esc 01**).

4.2 DISCUSIÓN

El balance hídrico contempla el procesamiento, análisis y determinación de cada una de las variables meteorológicas e hidrológicas que intervienen en forma directa en las ecuaciones involucradas en la obtención del balance.

La Región Hidrográfica del Titicaca cuenta con una red hidrometeorológica importante pero aún insuficiente, donde la mayoría de ellas registra para el periodo 1969 – 2004 la variable precipitación, es decir han tenido la categoría de pluviométricas, pero a partir del año 2005 muchas de ellas han sido recategorizadas a climatológica ordinaria, donde se registra las variables de temperatura, evaporación, viento entre otros parámetros climáticos, cuyos registros resultan insuficientes para el análisis de estas variables, lo que ha conllevado a realizar análisis regionales con información de cuencas vecinas y a generar una grilla de 10 x 10 km, donde se ha generado una estación virtual y, con la ayuda del software hydraces a generar información en cada punto de la grilla. Sin embargo la información que se registra es de buena confiabilidad.

El tratamiento matemático y estadístico realizado a cada una de las variables permitió conocer los errores sistemáticos o de medición, que fue corroborado en el trabajo de campo realizado en la cuenca, los cuales fueron corregidos dejando la información homogénea; además, se realizó la extensión del período de registro, en vista que no todas las estaciones presentaban un período común.

La homogenización de cada una de las variables seleccionadas en el estudio, permitió conocer además la importancia de tener y mantener una red operativa, ya que la dificultad más grande es no contar con información básica para realizar los análisis y evaluaciones respectivas.

La inclusión de un análisis regional mensual para cada una de las variables del ciclo hidrológico, mediante la interpolación por tres métodos distintos (Thiessen, inverso a la distancia e) generación de un modelo geoespacial, con un análisis de regresión múltiple donde interviene la latitud, longitud y altitud, permite adecuadamente caracterizar las zonas de menor o mayor variación de la variable analizada en la cuenca de estudio. Asimismo los coeficientes de correlación son muy significativos.

De acuerdo a los análisis realizados en los balances hídricos de cuencas del sur del país como: Chili, Camana-Majes, Tambo, Locumba, Caplina, Sama entre otras, se ha determinado que para el cálculo de la evapotranspiración el método que mejor se ajusta a las condiciones de las cuencas de nuestro territorio es la de **Penmam – Monteith**.

En la determinación de la evapotranspiración de cultivo (Etc), se tuvo que realizar una adecuada selección del coeficiente de cultivo (Kc), para lo cual se tuvo que zonificar la cuenca en función de los tipos de cultivos existentes y de acuerdo al período vegetativo del mismo, lo cual nos permite de alguna manera reflejar el comportamiento real de cada uno de los cultivos y sus influencia directa en la determinación del Kc medio.

Conocidos E_{To} y K_c se determinó E_{Tc} , que describe de alguna manera la pérdida de agua en la cuenca en función de la evaporación de agua desde superficies libres y de la transpiración por la cobertura vegetal.

En lo que respecta a la caracterización y zonificación hidrológica y meteorológica de las principales variables del ciclo hidrológico, se ha encontrado que cada una de ellas registra comportamientos particulares, en función de la altitud, mientras que la tendencia es creciente para la Precipitación y Horas de Sol, sin embargo la Temperatura, Velocidad de Viento, Evapotranspiración de Referencia decrecen, las cuales se conjugan para definir el balance hídrico total.

Los caudales en las subcuencas se han obtenido en base a la ecuación 3.51 y a la información de caudales de las estaciones: Puente Carretera – Ramis, Puente Carretera – Huancane, Puente Unocolla (Coata) y Puente Carretera llave, que en conjunto presentan un modulo medio anual de $172,55 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los mayores caudales se presentan en el período enero – abril y en el período mayo - octubre de cada año se presentan los menores valores, tal como se aprecia en la **Figura 4.49**. A nivel anual la cuenca del río Ramis, al poseer mayor área, aporta mas al escurrimiento superficial, con $5,283 \text{ litros/seg/km}^2$.

El nivel del lago Titicaca, además de una fluctuación anual, tiene también variaciones a la escala plurianual. Desde 1914, el intervalo de variación es de 6,37 metros.

El lago es alimentado por los aportes de los ríos de su contorno y por las lluvias que caen directamente en su superficie. Las pérdidas se deben a la evaporación y al desagüe superficial que sale por el Desaguadero. Algunos autores (CARMOUZE y AQUIZE JAEN, 1981; LOZADA, 1985) conciben una infiltración de las aguas por el fondo del lago, la cual contribuiría a la evacuación de las sales disueltas, en complemento de la evacuación superficial por el río Desaguadero y de la sedimentación físico-química y bioquímica en el lago mismo. Sin embargo, en la orilla, las capas freáticas están en carga con relación al nivel de agua libre (GUYOT *et al.*, 1990) Y así contribuyen a la alimentación del lago.

Las variaciones plurianuales de las precipitaciones en la hoya, la evaporación y la evacuación del recurso hídrico por el río Desaguadero (Puente Internacional) determinan así las variaciones del espejo de agua. Las aguas vertidas por el lago toman el curso del Desaguadero que drena también hacia el sur otras cuencas del Altiplano (Bolivia). El sistema hidráulico de pasos y de planos de agua que controla la salida de las aguas del lago resulta complejo, particularmente en período de niveles bajos.

Las salidas del lago son registradas en la estación Puente Internacional (río Desaguadero), la misma que se encuentra operada por el SENAMHI, cuya

estadística histórica registra información de caudales para el período 1957 – 1997, de donde se ha tomado el promedio de dicha serie, con la finalidad de conocer las salidas y/o aportes del Titicaca hacia el lago Poopò (Bolivia), que permita establecer el balance hídrico para el lago Titicaca. Para el período observado, se constata que los desagües anuales del lago aumentan por ciclos sucesivos, hasta el módulo máximo de 174 m³/s en 1986. El caudal diario máximo observado, de 254 m³/s, que tuvo lugar en abril de este mismo año. El módulo vertido es muy variable ya que algunos años es casi nulo a "negativo" (1971-1973).

Debido a la inercia del lago, y a las condiciones climáticas, se observa el caudal mensual máximo a la salida en abril (Figura 4.89), mes del nivel anual más alto del lago, en tanto que los aportes son más importantes en febrero. La decrecida es luego más progresiva, a tal punto que los volúmenes evacuados en mayo son más abundantes que los de marzo. A causa de este efecto regulador del lago, solamente 60 % del volumen anual es vertido en el Desaguadero de enero a junio mientras que los aportes fluviales del conjunto de la cuenca equivalen a más de 85 % para el mismo período.

Conocidos los valores mensuales de cada una de las variables de la expresión del balance hídrico, se determinó la disponibilidad de agua a nivel mensual en la cada una de las cuencas y subcuenca de la región hidrográfica del Titicaca, apreciándose un marcado déficit en el período mayo – octubre.

En las ubicadas al norte de la vertiente (Ramis y Huancane) hasta los puntos de control respectivos, presentan dos comportamientos, uno que ocurre entre diciembre a marzo, de superávit, que oscila entre 17, 4 mm/mes (diciembre en Huancane) y 100,8 mm/mes (enero en Ramis), con un superávit promedio de 55,7 mm/mes y; otro deficitario que se presenta en el período abril - noviembre de cada año, con un déficit promedio mensual es de 43,0 mm/mes.

Las cuencas del centro Coata e Illpa, también presentan dos comportamientos, uno de superávit que ocurre en el período diciembre – abril, donde el superávit promedio mensual es de 55,5 mm/mes.

En el sur las cuencas de llave y Ccallacame, tienen un comportamiento similar a las descritas anteriormente, donde el período de superávit se reduce a tres meses (enero – marzo), con un valor medio mensual de 58,8 mm/mes y, entre abril – diciembre el déficit mensual es de 51,6 mm/mes.

Las cuencas en conjunto presentan dos comportamientos, uno de superávit que ocurre de diciembre a marzo, donde exceso de agua 50,4 mm/mes y, el otro que se presenta de abril a noviembre, con un déficit mensual es de 49,7 mm/mes.

El lago Titicaca, hidrológicamente tiene una fase de ascenso de niveles de agua que ocurre de diciembre – abril, acumulando en dicho período un incremento de

801,70 mm y, otra fase de descenso que se presenta de mayo a noviembre con un descenso acumulado de 808,9 mm, existiendo un equilibrio en ambas fases.

Comparando con los niveles de agua del lago de la estación Muelle Enafer, se aprecia un diferencial entre el balance y los niveles de agua, lo cual ocurre, se tiene previsto, ya que para el estudio solo se ha considerado la parte Peruana. En el balance al lago, la precipitación representa el 48% al lago, los aportes por escurrimiento de los ríos es el 52%, asimismo del total de las perdidas de agua del lago la evaporación representa el 90%, las salidas por el río Desagaudero son el 9% y otros el 1%

Cabe destacar que la disponibilidad del recurso hídrico ha sido referida a las aguas superficiales, cuyos resultados del balance teórico se muestran en la **Tabla 4.38**, no habiéndose considerado el aporte de las aguas subterráneas en las diferentes etapas del ciclo hidrológico, sumado a ellos la ocurrencia de eventos extremos como El Niño y La Niña, así como la influencia debido al cambio climático, factores que estarían influenciando en los resultados obtenidos.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El clima de la región Hidrografica del Titicaca, templado de día y frío de noche debido a la altitud, corresponde al de una región de alta montaña sometida por su situación geográfica a un régimen tropical. La influencia de la gran masa de agua (lago) se hace sentir en la reducción de las amplitudes de las temperaturas. Asimismo el lago, con aguas más calientes que el aire circundante también influencia sobre las precipitaciones que alcanza sus mayores valores sobre el centro de la región, donde se ubica la isoyeta de 500 mm. El régimen hidrológico es tropical, con un incremento del escurrimiento en las cuencas orientales donde los glaciares cubren las altas montañas
- La información de precipitación total anual de las estaciones paralizadas, fue extendida mediante un análisis de correlación lineal simple, obteniéndose ajustes significativos en sus coeficientes, para luego mediante la técnica de pesos proporcionales completar la información a nivel mensual.
- Del modelo digital de elevación (DEM), que muestra la orografía del área en estudio, se ha construido una grilla con celdas de 10 km x 10 km, obteniéndose para la zona analizada 1377 cuadrículas, en las cuales se estimó la información de cada una de las variables del ciclo hidrológico.
- La masa de agua del lago, la orografía de la región, el aire húmedo proveniente de la amazonia y los vientos alisios del noreste, tienen una importante influencia sobre la distribución espacial de las precipitaciones en la región.

En el análisis se ha determinado que el régimen de precipitación presenta las características siguientes:

Las isoyetas son globalmente concéntricas al lago, las que disminuyen cuando la distancia al lago aumenta.

Enero es el mes más lluvioso, sobre el centro del lago la precipitación supera los 190 mm/mes, hacia la zona de la selva (Tambopata, Limbani), la precipitación supera los 500,0 mm/mes. Hacia las cuencas del norte (Ramis y Huancane) la lluvia promedio supera los 160,0 mm/mes, hacia el centro de la cuenca de los ríos Coata e Illpa, la precipitación supera los 180,0 mm/mes y hacia el sur (Ilave, Zapatilla, Ccallaccame), la lluvia supera los 175,0 mm/mes. En este mes se concentra casi el 25% de la precipitación anual.

Julio, donde se registran los menores aportes de precipitación, el comportamiento es el mismo, sobre el lago la lluvia promedio para dicho mes es de 4,0 mm, hacia la parte de la selva la lluvia supera los 20,00 mm, hacia las cuencas del norte esta lluvia supera los 3,0 mm, hacia el centro es de 2,5 mm y hacia el sur la lluvia puede superar 1,5 mm.

En base a esta descripción se concluye que existe un gradiente norte – sur de las precipitaciones, pero también hay otro gradiente este – oeste, con menos lluvia en el altiplano que en los llanos, debido a la presencia de la cordillera oriental que no permite el paso de los vientos húmedos hacia el altiplano.

- El régimen térmico en la cuenca, registra un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, asimismo esta variable se encuentra influenciada por diversas variables como: latitud, longitud, altitud y la gran masa de agua del lago.

En el análisis se ha observado que durante los meses de enero y febrero se registran las mayores temperaturas medias, las cuales oscilan entre 14 °C y 8 °C, y las menores temperaturas entre Julio y Agosto que varían entre 10 °C y 0,0 °C.

Los menores valores de temperatura mínima se presenta en julio y agosto las cuales oscilan entre - 10,0°C y 4°C y las mayores ocurren en febrero con - 2,0°C y 8,0°C. Hay que mencionar que los menores valores de esta variable ocurren en zonas alejadas del lago, especialmente hacia la parte alta de la cuenca de llave y subcuenca del río Azangaro. Sobre el espejo de agua los valores anuales fluctúan entre 2°C y 6°C.

Los mayores valores de temperatura máxima, se registran entre enero y febrero, que oscilan entre 10,0°C y 20,0°C, y las menores en julio con valores que varían de 10,0°C a 18,0°C. Sobre el espejo de agua la temperatura máxima anual oscila entre 12°C y 16°C.

- El régimen eólico, en la región del altiplano es extremadamente inestable, experimentando variaciones durante el día y a lo largo del año. En el análisis se ha determinado que:

La distribución eólica en la cuenca, experimenta un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, a nivel anual en promedio presenta valores que fluctúan de 1,5 m/s a 4,5 m/s. Los mayores valores ocurren hacia la zona sur de la región y sobre el espejo de agua los valores oscilan entre 2,0 m/s y 3,0 m/s, los cuales se intensifican con mayor intensidad en horas vespertinas.

A nivel mensual los mayores valores fluctúan entre 2,0 m/s y 5,5 m/s, sin embargo sobre el espejo de agua del lago, los valores se mantienen inalterables (2,0 a 3,0 m/s).

- En el análisis de la humedad relativa en la zona, se ha observado que los mayores valores se encuentran en las cercanías del espejo de agua, con valores que oscilan entre 55% y 65%, disminuyendo hacia el sur donde los valores son inferiores al 50% (característica de climas áridos).

En el periodo junio – octubre se presentan los menores valores, los cuales pueden ser inferiores al 50% en toda la región y los mayores valores se dan en el periodo de lluvias (diciembre – marzo), donde los valores pueden superar al 65% a excepción de algunas localidades como Pampahuta, Macusani y otras.

- Las horas de sol, durante el año, en promedio presenta sus mayores valores en el período mayo – octubre, con una media de 273,9 Horas/mes y los menores valores ocurren entre noviembre y abril, con una media de 211,2 horas/mes.
Los mayores valores se concentran sobre la zona concentrica al lago. En la estación de Puno la media mensual es de 254,0 horas/mes y en Desaguadero la media es de 246,5 horas,, lo que indica que esta es muy similar en la las cercanías del lago.
Esta variable presenta una realción inversa con la altitud, en la zona del altiplano. A nivel anual el promedio es de 242,5 horas/mes.
- Los valores Eto, registran un comportamiento variable en su distribución mensual, y los valores obtenidos son relevantes para el uso consuntivo de los cultivos, esta variable varía aproximadamente entre 1000 y 1500 mm. en todo el altiplano y no parece existir una relación entre al ETo y la altitud La evapotranspiración de referencia (Eto), registra sus mayores valores en el período setiembre - abril, con un promedio de 124,3 mm/mes y, los menores en el período Abril – agosto con un valor medio de 95,5 mm/mes. Los mayores valores de esta variable se concentran hacia el sur de la vertiente (Ccallaccame, Maure), donde los valores mensuales superan los 110,0 mm/mes. A nivel anual en la región los valores oscilan entre 1100 a 1500 mm.
- En función de los diferentes tipos de cultivos que existen en la cuenca, los cuales fueron identificados y evaluados en su período vegetativo, se estimo el coeficiente del cultivo (Kc) promedio para cada estación, para luego estimar la evapotranspiración de cuktivo, la que presenta dos periodos, uno de máximo que se prseenta de octubre a marzo, con un valor medio de 85,9 mm y uno de minimos que ocurre de abril a setiembre con un promedio mensual de 69,5 mm.
- La región del Titicaca presenta dos comportamientos, uno de superávit que ocurre de diciembre a marzo, donde exceso de agu 50,4 mm/mes y, el otro que se presenta de abril a noviembre, con un déficit mensual es de 49,7 mm/mes.
- Durante la fase de ascenso el lago Titicaca, se incrememnta 801,70 mm y, en la fase de descenso el acumulaldo es de 808,9 mm, existiendo un equilibrio en ambas fases.
- En el balande del lago y comparádo con los niveles de agua del lago de la estación Muelle Enafer, se aprecia un diferencial entre el balance y los niveles de agua, situación que podrai presentarse debido a que el estudio solo se esta referido a la parte Peruana de la vertiento región.
- En el balance al lago , la precipitación representa el 48% al lago, los aportes por escurrimiento de los ríos es el 52%, asimismo del total de las perdidas de agua del lago la evaporación representa el 90%, las salidas por el río Desaguadero son el 9% y otros el 1%

5.2 Recomendaciones

- La mayoría de variables climáticas que intervienen en el balance hídrico superficial de la región hidrográfica, han sido obtenidas mediante análisis regionales, que nos permiten de una manera práctica representar el comportamiento espacial y temporal de cada una de ellas, sin embargo es indispensable contar con información medida en la zona.
- Es necesario e importante que el SENAMHI, como Organismo Rector de las actividades meteorológicas e hidrológicas, fortalezca su red hidrometeorológica en la parte alta de las cuencas, con equipos que registre más variables climáticas, asimismo es necesario la realización de aforos a la salida del lago en río Desagudero, que permite conocer con certeza y precisión los aportes o salida de agua hacia el Poopò (Bolivia) y, poder confrontar los resultados obtenidos en el Balance hídrico superficial.
- Es importante que se realicen alianzas estratégicas con otras Instituciones, como Autoridad lago Titicaca (ALT), SENAMHI (Bolivia), con la finalidad de realizar el Balance Hídrico en forma integral del la vertiente del Titicaca, así como del sistema Titicaca – Desagudero - Poopò – Salar de Coipasa (TDPS), así como corroborar los resultados obtenidos en este estudio.

CAPITULO VI: BIBLIOGRAFÍA

6.1 Bibliografía

1. ALIAGA ARAUJO Vito (1983), Tratamiento de datos hidrometeorológicos, Lima.
2. CHEREQUE MORAN Wendor (1989), Hidrología para estudiantes de ingeniería civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, obra auspiciada por CONCYTEC, Lima, Perú, 223 pp.
3. ESTRELA Teodoro (1992), Metodología y recomendaciones para la evaluación de los recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos – Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación, Madrid España. 52 p.
4. FAO (1998), Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Roma, 301 p.
5. GARCIA VILLANUEVA Jerónimo (1994), Principios físicos de Climatología, Lima, Perú 243 p.
6. GOMEZ LORA Walter (1987), Primer curso nacional de recursos hídricos, Lima. Perú
7. GUEVARA, E. y CARTAYA, H. 1991, HIDROLOGIA. Una introducción a la ciencia Hidrológica Aplicada. GUECA EDICIONES. Valencia, Venezuela, 358p.
8. HUADE GUAN, HUANG-HSIUBG HSU, OLEG MAKHNIN y JOHN WILSON, 2008 " Examination of selected atmospheric and orographic effects on monthly precipitation of Taiwan using the ASOADEK model.
9. INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS NATURALES – INRENA (1992), Estudio básico situacional de los recursos hídricos del Perú, Lima.
10. INADE – Proyecto Especial Tacna (2001) Diagnóstico de gestión de la oferta de agua cuencas: Caplina, Sama, Locumba y Maure – Uchusuma, Lima 2001.
11. INADE, Proyecto Binacional Lago Titicaca – PELT, 2001, Macrozonificación Ecológica Económica del Sistema TDPS, Puno 2001.
12. MENDOZA APARRICIO Julio (1994), Altiplano, marco problemas, recursos y propuestas, Perú, Arequipa 1994.
13. ONERN (1976), Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa, cuencas de los ríos Moquegua, Locumba, Sama y Caplina, Volumen I, Lima 1976.
14. PNUMA ONU, 2011, Perspectivas del medio ambiente en el sistema hídrico Titicaca – Desagadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS).
15. M.A Rache, Jacques Borgues, Jase Cortes, Roger Matias, 1999, Climatología e Hidrología de la cuenca del lago Titicaca.
16. S. NAOUM and L.K.TSANIS, 2004 "A multiple linear regression GIS model using spatial variables to model orographic rainfall.

17. SÁNCHEZ SAN ROMAN, J. 2001, El agua en el suelo.
Web.usual.es/~ javisan/hidro/temas/T040
18. SIAR, 2001. Metodología – Determinación de la evapotranspiración de referencia (Eto). Universidad Castilla la Mancha – servicio Integral de Asesoramiento al regante.
19. SERVICIO NACIONAL DE METOROLOGIA E HIDROLOGIA – SENAMHI (2008), Balance hídrico superficial de la cuenca del río Caraveli.
20. SERVICIO NACIONAL DE METOROLOGIA E HIDROLOGIA – SENAMHI (1976 – Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos “Atlas de cuencas del Perú”.
21. SERVICIO DE METOROLOGIA E HIDROLOGIA NACIONAL – SMHN, 1999, Humedad relativa del aire.
22. VERA AREVALO Héctor (2010), El Niño y los caudales en la vertiente del Titicaca, Revista N°1 Peruana Geo-Atmosferica, Edición 2010, Lima – Perú.
23. VERA AREVALO Héctor (2011), Aplicación del modelo GR2m a la cuenca del río Ramis, 4ta Reunión Científica del ORE – HIBAM, Hidrología y Geodinamica actual de las cuencvas Sudamericanas, Lima, setiembre, 2011.
24. UNESCO, Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur, Uruguay – 1982.
25. <http://www.hidromet.com.pa>.
26. SINGH (1989), Hidrologic systems Vol II watershed modeling Prentice Hall, New Jersey 320 p.
27. <http://esmiperu.blogspot.com/2007/11/la-yarada-y-el-valle-del-caplina-tacna.html>
28. <http://www.ingemmet.gob.pe/publicaciones/Cap7-Trab1.pdf>

RESUMEN

El presente estudio forma parte de las actividades que desarrolla la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, con el fin de contribuir al desarrollo del país mediante el conocimiento del comportamiento hidrológico y meteorológico de las principales variables que forman parte del ciclo hidrológico (precipitación, evaporación, transpiración, escurrimiento).

La cuantificación de cada una de las variables del ciclo hidrológico, nos permitirá conocer la disponibilidad del recurso agua en la cuenca a nivel espacial y temporal, mediante la determinación del Balance Hídrico superficial.

El trabajo se inicia con la selección y recopilación de la información hidrológica y meteorológica, habiéndose conseguido recopilar información de 60 estaciones (Pluviométricas, Climatológicas Ordinarias, Meteorológicas Agrícolas Principal e Hidrológicas) del SENAMHI, ubicadas en la zona de estudio (52) y en el entorno de la cuenca (08), de total de estaciones 09 de ellas se encuentran paralizadas o desactivadas, pero casi el 45% de ellas registran variables climáticas a partir del año 2005; para el análisis de caudales se ha tenido en cuenta 04 estaciones hidrológicas las mismas que se encuentran operativas y registran información con algunos vacíos desde 1957.

En el trabajo de gabinete, se realiza el procesamiento automático de la información de precipitación, temperatura, viento, horas de sol, humedad relativa y caudales medios mensuales de la cuenca, con el fin de caracterizar el régimen hidrológico y meteorológico, para ello se seleccionó el período comprendido entre 1969 y 2010, abarcando un total de 41 años.

Con el fin de conocer si los datos de precipitación mensual recopilados en cada una de las estaciones, son consistentes y representativas de la zona, se realizó un análisis de consistencia, para lo cual se agruparon las estaciones en quince grupos de trabajo teniendo en cuenta su altitud y distribución espacial y temporal; como resultado de este análisis se tuvo que corregir la información de aquellas estaciones que presentaron saltos y quiebres, lo cual nos permitió uniformizar el período de información (1969 – 2010).

Al contar con escasa información fue necesario construir una grilla de 10kmx10km, en cuyos vértices y con el apoyo del Hydraces se generó información de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico (precipitación, temperatura, etc.) que nos permita caracterizar la zona de estudio de la manera siguiente:

- La distribución de la precipitación en la cuenca, a nivel medio mensual registra un comportamiento variable con valores que fluctúan entre 0,0 mm

y 400 mm; siendo enero el mes más lluvioso, donde se registra el 23% de la precipitación total anual.

- El período lluvioso se inicia en noviembre y termina en abril del año siguiente; siendo en este período donde se produce el 87% de la precipitación total del año.
- En el período mayo – noviembre, se registra el 13% de la precipitación acumulada anual, siendo julio el más seco, donde se registra el 0,6% de la precipitación anual.
- La zona de mayor precipitación, esta ubicada en la parte alta de la cuenca, del río Ramis hacia la zona de la selva (Sandia, San Gaban), donde la precipitación anual puede superar los 800 mm/año; asimismo sobre el centro de la región sobre el espejo de agua del lago la precipitación anual también supera los 800 mm/año.
- La zona de menor precipitación, esta ubicada en la zona sur de la vertiente; donde la precipitación anual llega a los 300 mm/año y, en el mes más seco (Julio) la precipitación es totalmente escasa.
- La precipitación media areal en toda la región hidrográfica es de 748,5 mm.
- La precipitación mínima, varía de 0,0 mm a 150 mm, siendo enero, el mes donde se presentan los mayores valores de este parámetro.
- En el período mayo – setiembre, se presentan los menores valores de precipitación mínima, siendo junio, julio y agosto los más secos del año.
- La menor precipitación mínima total anual se registra en la parte sur de la región, sobre la parte alta de llave, Uchusuma, Ccallaccame y Maure donde esta puede ser totalmente escasa.
- La precipitación máxima mensual varía entre 20 mm y 800 mm, siendo enero donde ocurren los mayores valores, especialmente en la parte alta de la cuenca del río Ramis y sobre la parte central del espejo de agua del lago, los valores fluctúan entre 400 mm y 700 mm.
- Los menores valores de precipitación máxima areal, se presenta en la zona de la región sobre la parte altas de las cuencas de llave, Ccallaccame, Maure entre otros, con valores de inferiores a los 20 milímetros en el mes más seco del año (julio).
- La distribución espacial de las precipitaciones esta influenciada por la orografía y por la gran masa de agua que representa el lago. El aire amazónico húmedo que desborda ocasionalmente la cordillera Oriental, especialmente en época de lluvias y los vientos alisios del nordeste llevan el agua al sistema hidrológico, aunque en cantidades menores sobre el Altiplano que sobre el flanco amazónico. Cuando la altitud disminuye en dirección del lago, la presión y la temperatura aumenta lo que ocasiona una disminución de la humedad relativa y, por lo tanto una disminución de las precipitaciones.

El análisis de la variable temperatura, permitió conocer su distribución espacial y temporal; así como su comportamiento, que en resumen se puede decir, que

sigue el típico patrón anual de variación que corresponde a su latitud geográfica tropical. Es decir, las temperaturas son altas en los meses de verano, bajas en los de otoño e invierno y de medianas a altas en los meses de primavera. Pero la altitud en que se encuentra el Altiplano de 3,800 a 4,500 metros sobre el nivel del mar, hace que este tipo de régimen térmico resulte muy desfavorable, pues es causa de que las temperaturas en los meses de otoño e invierno desciendan a niveles extremadamente bajas, siendo necesario mencionar que la temperatura constituye el factor decisivo para la determinación de la aptitud agrícola y pecuaria en la región.

Del análisis de esta variable, se indica lo siguiente:

- La temperatura media, registra en enero y febrero los mayores valores que fluctúan entre 8,0° C y 14,0°C y el más frío son julio y agosto con 0,0°C y 10,0°C. A nivel medio anual la temperatura media varía entre 6°C y 10°C, alrededor del lago es superior a los 8°C, Boulange y Aquize (1981), evalúan que la temperatura media anual a nivel del lago debería ser de 0°C y atribuyen la diferencia de temperatura al efecto termoregulador de la masa de agua.
Hacia la frontera con Arequipa y Cusco (parte alta de la subcuenca Azangaro, estaciones Santa Rosa y Lagunillas) así como hacia la parte alta de la cuenca de llave, se presentan los menores valores anuales que varía entre 4°C y 6°C.
- Los menores valores de temperatura mínima se presenta en julio y agosto las cuales oscilan entre - 10,0°C y 4°C y las mayores ocurren en febrero con - 2,0°C y 8,0°C. Hay que mencionar que los menores valores de esta variable ocurren en zonas alejadas del lago, especialmente hacia la parte alta de la cuenca de llave y subcuenca del río Azangaro. Sobre el espejo de agua los valores anuales fluctúan entre 2°C y 6°C.
- Los mayores valores de temperatura máxima, se registra durante enero y febrero, los que oscilan entre 10,0°C y 20,0°C, y las menores en julio con valores que fluctúan entre 10,0°C y 18,0°C. Sobre el espejo de agua la temperatura máxima anual oscila entre 12°C y 16°C.

Al analizar la variable de humedad relativa, se ha encontrado que:

Que los mayores valores se encuentran en las cercanías del espejo de agua, con valores que oscilan entre 55% y 65%, disminuyendo hacia el sur donde los valores son inferiores al 50% (característica de climas áridos).

En el periodo junio – octubre se presentan los menores valores, los cuales pueden ser inferiores al 50% en toda la región y los mayores valores se dan en el período de lluvias (diciembre – marzo), donde los valores pueden superar al 65% a excepción de algunas localidades como Pampahuta, Macusani y otras.

La variable de velocidad de viento, tiene las siguientes características:

- La distribución eólica en la cuenca, experimenta un comportamiento variable en su distribución espacial y temporal, a nivel anual en promedio presenta valores que fluctúan de 1,5 m/s a 4,5 m/s. Los mayores valores ocurren hacia la zona sur de la región y sobre el espejo de agua los valores oscilan entre 2,0 m/s y 3,0 m/s, los cuales se intensifican con mayor intensidad en horas vespertinas.

A nivel mensual los mayores valores fluctuane entre 2,0 m/s y 5,5 m/s, sin embargo sobre el espejo de agua del lago, los valores se mantienen inalterables (2,0 a 3,0 m/s).

Es notorio el efecto de pantalla y de abrigo bajo el viento asegurado por las cimas mas altas de la cordillera, asimismo las masas de aire húmedo amazónico se encuentran frecuentemente bloqueo por estas cimas.

Con respecto a la variable de horas de sol, el análisis nos indica lo siguiente:

Experimenta un comportamiento variable en la distribución espacial y temporal, pero en la zona del altiplano el gradiente es inverso a la altitud a menores altitudes mayores horas de sol, asimismo los mayores valores se concentran sobre la zona circunlacustre, con valores similares en toda su área, lo que se demuestra con los valores de la estación de Puno, donde la media mensual es de 254,0 horas/mes y en Desaguadero la media es de 246,5 horas.

En el período mayo – octubre, se presentan los mayores valores con una media de 273,9 Horas/mes y los menores valores ocurren entre noviembre y abril, con una media de 211,2 horas/mes. A nivel anual el promedio es de 242,5 horas/mes.

La determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se realizó mediante la aplicación del método de Penman – Monteith, el cual fue desarrollado y aplicado por la FAO, y utilizado debidamente en los balances hídricos de las cuencas del sur del nuestro País como: Chili, Camana-Majes, Tambo, Ilo-Moquegua, Sama, Locumba y Caplina, entre otras, donde se ha obtenido muy buenos resultados

Variable que parece no tener ninguna relación o dependencia con la altitud, registra su mayores valores en el período setiembre - abril, con un promedio de 124,3 mm/mes y, los menores en el período Abril – agosto con un valor medio de 95,5 mm/mes.

Los mayores valores de esta variable ocurren en la parte sur de la vertiente (Ccallaccame, Maure), donde los valores mensuales superan los 110,0 mm/mes. A nivel anual los valores en toda la región oscilan entre 1100 a 1500 mm.

Asimismo, para obtener la evapotranspiración de cultivo (ET_c), ha sido necesario conocer el valor del coeficiente de cultivo (K_c).

Esta cuenca a nivel areal la ET_c presenta dos ciclos o períodos, alcanzando los valores máximos entre octubre y marzo, con un valor promedio mensual de 85,9 mm y otro de valores mínimos que se presenta de abril a setiembre, con un valor medio mensual de 69,5 mm.

A nivel anual los valores fluctúan de 800 mm a 1100 mm.

El caudal en las cuencas de Suches e Illpa, se ha obtenido en base a la información de caudales de cuencas vecinas, como Huancane y Coata, respectivamente; la información de caudales en las subcuencas se ha obtenido en base a la información de caudales de las estaciones que integran en cada una de las cuencas, cuyos módulos medios anuales son:

$$\begin{aligned} \overline{QPuente - Carretera - Ramis} &= 76,5m^3 / s \\ \overline{QPuente - Carretera - Huancane} &= 18,95m^3 / s \\ \overline{QPuente - Unocolla - Coata} &= 41,5m^3 / s \\ \overline{QPuente - Carretera - Ilave} &= 35,6m^3 / s \\ \overline{QPuente - Internacional - Desaguadero} &= 27,6m^3 / s \end{aligned}$$

Los mayores caudales se presentan en el período enero – abril y en el período mayo - octubre de cada año se presentan los menores valores, pero en el caso del caudal de salida del lago (Desaguadero), los mayores caudales se presentan en abril luego la decrecida es progresiva, a tal punto que los volúmenes evacuados en mayo son más abundantes que los de marzo. A causa de este efecto regulador del lago, solamente el 60 % del volumen anual es vertido en el Desaguadero de enero a junio mientras que los aportes fluviales del conjunto de la cuenca equivalen a más de 85 % para el mismo período.

Conocidos los valores de precipitación y evapotranspiración, se determinó los valores mensuales del escurrimiento superficial, mediante la aplicación de la ecuación del balance hídrico, se determinó la disponibilidad de agua a nivel mensual en la cada una de las cuencas y subcuenca de la región hidrográfica del Titicaca, apreciándose un marcado déficit en el período mayo – octubre.

Las cuencas del norte de la vertiente (Ramis y Huancane) hasta los puntos de control respectivos, presentan dos comportamientos, uno que ocurre entre diciembre a marzo, de superávit, que oscila entre 17,4 mm/mes (diciembre en Huancane) y 100,8 mm/mes (enero en Ramis), con un superávit promedio de 55,7 mm/mes y; otro deficitario que se presenta en el período abril - noviembre de cada año, con un déficit promedio mensual es de 43,0 mm/mes.

En las cuencas del centro Coata e Illpa, el superávit ocurre en el período diciembre – abril, donde el superávit promedio mensual es de 55,5 mm/mes.

En el sur las cuencas de llave y Ccallacame, tienen un comportamiento similar a las descritas, donde el período de superávit se reduce a tres meses (enero – marzo), con un valor medio mensual de 58,8 mm/mes y, entre abril – diciembre el déficit mensual es de 51,6 mm/mes.

La región en conjunto presentan dos comportamientos, uno de superávit que ocurre de diciembre a marzo, donde exceso de agua 50,4 mm/mes y, el otro que se presenta de abril a noviembre, con un déficit mensual es de 49,7 mm/mes.

El lago Titicaca, hidrológicamente tiene una fase de ascenso de niveles de agua que ocurre de diciembre – abril, acumulando en dicho período un incremento de 801,70 mm y, otra fase de descenso que se presenta de mayo a noviembre con un descenso acumulado de 808,9 mm, existiendo un equilibrio en ambas fases.

Comparando con los niveles de agua del lago de la estación Muelle Enafer, se aprecia un diferencial entre el balance y los niveles de agua, lo cual ocurre, se tiene previsto, ya que para el estudio solo se ha considerado la parte Peruana.

En el balance al lago, la precipitación representa el 48% al lago, los aportes por escurrimiento de los ríos es el 52%, asimismo del total de las perdidas de agua del lago la evaporación representa el 90%, las salidas por el río Desagaudero son el 9% y otros el 1%

Cabe destacar que la disponibilidad del recurso hídrico ha sido referida a las aguas superficiales, no habiéndose considerado el aporte de las aguas subterráneas en las diferentes etapas del ciclo hidrológico, sumado a ellos la ocurrencia de eventos extremos como El Niño y La Niña, así como la influencia debido al cambio climático, factores que estarían influenciando en los resultados obtenidos.

