

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**APLICACIÓN DEL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) PARA
SIMULAR CAUDALES MENSUALES CON FINES AGRICOLAS EN LA CUENCA DEL RIO
KEKA**

ROCIO QUISPE JULY

LA PAZ - BOLIVIA

2015

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

**APLICACIÓN DEL MODELO SWAT (SOIL AND WATER
ASSESSMENT TOOL) PARA SIMULAR CAUDALES MENSUALES
CON FINES AGRICOLAS EN LA CUENCA DEL RIO KEKA**

Tesis de grado presentado como requisito

Parcial para optar el Título de

Ingeniero Agrónomo

ROCIO QUISPE JULY

ASESORES:

Ing. Ph.D. René Chipana Rivera

Ing. M.S.c. German Mario Copa Mamani

TRIBUNAL EXAMINADOR:

Ing. Ph. D. Magali Garcia Cardenas

Ing. Ph. D. Aquiles Arce

Ing. M.S.c. Paulino Ruíz Huanca

APROBADA:

.....
Presidente Tribunal Examinador

LA PAZ - BOLIVIA

2015

DEDICATORIA

A mi familia: Alfredo Quispe y Lucia July mis padres y a mis hermanas por su incondicional apoyo, paciencia, comprensión y enseñanzas.

A los compañeros (as) que luchan a pesar de la adversidad del destino por alcanzar sus nobles ideales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme en todo momento, por brindarme su fortaleza y fuerza al tiempo de desarrollar los estudios de licenciatura.

A la Universidad Mayor de San Andrés y la facultad de agronomía por el importante papel que cumplió en mi formación académica.

Al proyecto de Fontagro por la facilitación de equipos de trabajo y equipo técnico en general quienes apoyaron en la capacitación sobre la evaluación hidrológica de cuenca.

Al Ing. Ph. D. René Chipana, que en su condición de asesor del trabajo impartió consejos para el buen desarrollo de la investigación sobre la implementación de nuevas metodologías de estudio en la cuenca del Rio Keka.

Al Ing. Jose Luis Delgado, por su colaboración y apoyo a la investigación con las correcciones y recomendaciones oportunas permitiendo el desarrollo del trabajo de una manera constante.

Y desde luego a mis compañeros y amigos de la facultad por estar a mi lado por su apoyo moral consecuente durante todo el tiempo de desarrollo y progreso del trabajo de investigación, con cada uno compartí momentos importantes que me motivaron a seguir adelante.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Cuenca Hidrológica	3
2.2 Recursos Hídricos	3
2.3 Modelación Hidrológica de Cuencas	4
2.4 Clasificación de los Modelos Hidrológicos de Cuencas	4
2.4.1 Clasificación Según la Forma de Descripción del Proceso	5
2.4.2 Clasificación Según Escala de Tiempo	5
2.4.3 Modelo Hidrológico Distribuido	5
2.4.4 Descripción de Modelos Hidrológicos	6
2.5 Descripción del Modelo SWAT (soil Water Assessment Tool)	10
2.6 Uso de la Tierra	11
2.7 Propiedades Físicas del Suelo	12
2.7.1 Textura	12
2.7.2 Densidad Aparente	13
2.7.3 Muestreo de Suelo	13
2.8 Determinación de Caudales en la Cuenca	13
2.8.1 Método del Molinete	13
2.9 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	14
2.10 Necesidades de Riego en Bolivia	15
2.10.1 El Riego	16
2.11 Caudal Ecológico	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 Materiales	17
3.1.1 Equipos y materiales para el proceso de imágenes	17
3.1.2 Equipos de gabinete	17
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA	17

3.2.1 Localización	17
3.2.2 Características climáticas	17
3.3 Metodología	21
3.3.1 Recopilación de Información secundaria	21
3.3.1.1 Evaluación Climática	21
3.3.1.2 Información Hidrológica	21
3.3.2 Reconocimiento del Área de Estudio	22
3.3.2.1 Trabajo de Campo	22
3.3.2.1.1 Determinación de Caudales	22
3.3.2.1.2 Muestreo de suelos	23
3.3.3 Fase de Gabinete	24
3.3.3.1 Fuentes de información utilizada en el modelo SWAT	24
3.3.3.1.1 Datos geográficos	25
3.3.3.2 Descripción del Proceso Realizado en el Programa SWAT	25
3.3.3.2.1 Proceso cartográfico	25
3.3.3.2.2 Ingreso de información Hidroclimática	26
3.3.3.2.3 Simulación y calibración en el modelo SWAT	27
4. RESULTADOS	29
4.1 Aplicación del modelo SWAT	29
4.1.1 Preparación de la información meteorológica	29
4.1.2 Mapas Digitales	31
4.1.3 Características de Cobertura de la Cuenca del Río Keka	32
4.1.4 Características Físicas de la Cuenca del Río Keka	33
4.1.4.1 Descripción de los suelos de la zona de estudio	33
4.1.4.2 Características físicas del suelo	36
4.1.5 Simulación del SWAT	37
4.1.5.1 Simulación y Calibración del SWAT	39
4.1.6 Evaluación del Río Keka para Fines Agrícolas	42
4.1.6.1 Balance Hídrico actualizado	42
4.1.6.2 Oferta mensual de agua con proyecto	43
4.1.6.3 Eficiencias del sistema de riego Cuenca Río Keka	43
4.1.6.4 Demanda de agua	44

4.1.6.5 Calendario agrícola.....	44
4.1.6.6 Requerimiento de Riego.....	45
4.1.6.8 Precipitación efectiva.....	46
4.1.6.9 Determinación de Uso Consuntivo utilizando Coeficientes de cultivos K_c	46
4.1.6.10 Calculo de la Evapotranspiración real (ETR).....	48
4.1.6.11 Requerimiento de Riego.....	48
4.1.6.12 Determinación del área de Riego incremental.....	49
5. CONCLUSIONES	50
6. RECOMENDACIONES	51
7. BIBLIOGRAFÍA	52

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos Hidrológicas de Simulación	9
Cuadro 2. Zonas agroecológicas con déficit hídrico	15
Cuadro 3. Estación meteorológica utilizada en el modelo	21
Cuadro 4. Estación hidrológica utilizada en el modelo	22
Cuadro 5. Fuentes de Información Seleccionada Inicialmente	24
Cuadro 6. Parámetros para la calibración de caudales del programa SWAT	27
Cuadro 7. Parámetros utilizados en el Generador de clima SWAT	29
Cuadro 8. Comportamiento pluvial de la zona de estudio	30
Cuadro 9. Clases de Cobertura, denominación y porcentaje de Área (%)	32
Cuadro 10. Clases de Suelo, denominación y porcentaje de Área (%)	33
Cuadro 11. Textura de Suelos en Comunidades de la Cuenca del Río Keka	37
Cuadro. 12 caudales mensuales reales en (m ³ /s) del SENAMHI 2003-2012	38
Cuadro. 13 caudales mensuales simulados en (m ³ /s) 2003-2012 con el SWAT	38
Cuadro 14. Principales variables de calibración y parámetros estadísticos en el moldeamiento con SWAT	40
Cuadro 15. Datos de caudales (m ³ /s) de la calibración 2003-2012 con el modelo SWAT	41
Cuadro 16. Volúmenes de agua disponible	43
Cuadro 17. Caudal aforado Cuenca Río Keka (SENAMHI)	43
Cuadro 18. Eficiencias de riego en la situación sin y con proyecto	44
Cuadro 19. Demanda de agua de los cultivos con proyecto	44
Cuadro 20. Calendario agrícola con proyecto	45
Cuadro 21. Evapotranspiración según Penman – Monteith	46
Cuadro 22. Precipitación media y precipitación efectiva	46
Cuadro 23. Resumen de requerimiento de riego de los cultivos con proyecto	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Molinete	14
Figura 2. Medición de Caudal Método Molinete	23
Figura 3. Muestreo de Suelo (Método Barreno)	24
Figura 4. Flujiograma de la simulación de caudales con el programa SWAT	28
Figura 5. Temperaturas Anuales (2003-2012)	30
Figura 6. Comportamiento Pluvial de la zona de estudio	30
Figura 7. Delimitación automática del programa SWAT	31

Figura 8. Simulación de caudales mensuales por el programa SWAT	31
Figura 9. Montaña Alta con disección fuerte	33
Figura 10. Serranía Media con disección moderada a fuerte	34
Figura 11. Colina baja con disección ligera	34
Figura 12. Pie de Monte	35
Figura 13. Valle Glaciar	35
Figura Nº 14. Llanura Coluvio Aluvial	35
Figura 15. Bofedales	36
Figura 16. Hidrograma de simulación de caudales (Q= Caudal simulado, Q= Caudal observado) mensuales 2003-2012	37
Figura 17. Grado de correlación entre series de caudal mensual observado y simulados con el modelo SWAT.	39
Figura 18. Hidrograma resultante de la calibración 2003-2012 con el modelo SWAT	41
Figura 19. Grado de correlación entre series de caudal mensual observado y calibrado con el modelo SWAT.	42

INDICE DE MAPAS

Mapa 1 Mapa de ubicación y delimitación de la cuenca del río Keka	20
Mapa 2. Modelo Digital de Elevación (MED) – Cuenca del río Keka.	ANEXO
Mapa 3. Cobertura Vegetal – Cuenca del Río Keka	ANEXO
Mapa 4. Mapa de Suelos – Cuenca del río Keka.	ANEXO
Mapa 5. Cultivos Agrícolas – Cuenca del Río Keka.	ANEXO

RESUMEN

Con el uso de la herramienta para evaluación del modelo SWAT (soil and water assessmet tool), en interface con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realizó el presente estudio en la cuenca del Río Keka, la que se encuentra en las provincias de Omasuyos y los Andes del Departamento de La Paz. Generalmente en los últimos años, se ha producido un interés creciente en el sector agrícola para determinar cuál será la disponibilidad de agua en el futuro. Para esto es necesario entender y considerar los siguientes aspectos: La importancia que tiene el manejo del agua en la producción agropecuaria, de los diferentes sistemas de producción, la necesidad de desarrollar metodologías que integren los balances hídricos por ser una fuente directa de interrelación de aspectos sociales, culturales, económicos, políticos y ecológicos. Con la información existente es difícil concluir que exista una disminución en la oferta hídrica pero si se puede aseverar, que cada vez más, los caudales máximos y mínimos presentan variaciones extremas que impiden que el agua esté disponible en épocas críticas. El objetivo del trabajo de investigación, fue la aplicación del modelo SWAT (soil and wáter assessmet tool) para simular caudales mensuales con fines agrícolas en la cuenca del río Keka, la evaluación que se realizó para este trabajo fue de diez años, la categorización y el desarrollo fue la recopilación de Información secundaria la que fue preparada y procesada para su uso en el programa SWAT y conjuntamente con él se realizó el reconocimiento de la área de estudio, posteriormente se realizó la evaluación de la información climática e hidrológica, que fue recolectada del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), a continuación se procedió a utilizar el programa SWAT, con la introducción de la cartografía cada uno en su respectivo formato las cuales fueron, (DEM, COBERTURA DE SUELO, MAPA DE SUELO), para la utilización en el modelo, el programa realizo la delimitación automática de la cuenca la rasterización reclasificación y cruce de informaciones creando así sub cuencas y unidades de respuestas hidrológicas URH, la simulación realizada fue en los años 2003-2012, el modelo como respuesta nos muestra una simulación entre datos simulados realizados por el programa y datos obteniendo del SENAMHI, la simulación del SWAT en la cuenca ha revelado que el escurrimiento simulado durante un período de diez años consecutivos se pudo observar que los datos simulados presentan un coeficiente de correlación del 0,82 se acercan a los datos observados, mientras los datos calibrados presentan valores más cercanos a los reales con un coeficiente de correlación de 0,98 y muestra que los valores de los escurrimientos han sido significativos así podemos aseverar que es buena su capacidad para la simulación de la producción de agua, se concluye que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la simulación de escurrimientos en la producción de agua en la cuenca del Río Keka.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha producido un interés creciente en el sector agrícola, por determinar cuál será la disponibilidad de agua, generalmente se ha dado gran importancia en los niveles de precipitación.

Muchos de los esfuerzos se han orientado para documentar las variaciones climáticas como causa de estos fenómenos, con la información existente es difícil concluir que exista una disminución en la oferta hídrica pero si se puede aseverar, que cada vez más, los caudales máximos y mínimos presentan variaciones extremas que impiden que el agua esté disponible en épocas críticas. El aprovechamiento y manejo óptimo de los recursos hídricos cobra más necesidad en la actualidad, pero la información hidrométrica y meteorológica disponible sigue siendo escasa o casi nula.

De ahí la necesidad de probar la aplicabilidad y la eficiencia de modelos hidrológicos que permitan determinar la producción líquida, al menos, de una cuenca con escasa información a un nivel medio de precisión, como ser promedios mensuales.

La utilidad de los modelos nos permite simular datos de flujo en cauces naturales, produciendo datos en cuencas sin estaciones de medición de aforo para poder extrapolar registros cortos (Maldonado, 1990).

Un modelo matemático para simulación de parámetros hidrológicos, brinda la posibilidad de simular los posibles caudales que se producirían en una cuenca hidrográfica, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicha cuenca. La implantación de obras de captación, corrección de cauces, la urbanización, el cambio del uso de suelo, entre otros, son hechos que afectan directamente el movimiento y la producción del agua en una cuenca hidrográfica.

La aplicación de un modelo hidrológico, utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), es una valiosa herramienta que permite evaluar los procesos de escurrimiento en las cuencas, tomando en cuenta la distribución geográfica y temporal de las lluvias con influencia en el Área de estudio, se ha escogido el modelo matemático SWAT, por sus características de funcionamiento, la cual permitirá analizar caudales en la cuenca del río Keka.

Siendo la cuenca hidrográfica un territorio delimitado por la propia naturaleza, donde existe interrelación de aspectos sociales, culturales, económicos, políticos y ecológicos, entre otros por lo tanto físicamente representa una fuente natural de captación muy importante es por eso la importancia del agua, que tiene que ver con la disponibilidad para las poblaciones humanas, animales y vegetales y su aprovechamiento en la cuenca del río Keka.

El Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria (FONTAGRO), realiza actividades con proyectos que se enmarcan en establecer modelos de simulación, para contribuir a la generación de políticas de desarrollo y fomento de riego por parte de los organismos públicos y privados, conjuntamente con la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés.

El presente estudio se realizó en la cuenca del Río Keka, y el área de estudio pertenece a la Provincia Omasuyos y Los Andes del Departamento de La Paz, el área se extiende del Cantón Achacachi al norte y al este, Cantón Huarina al sur y Cantón Kerani, Villa San Juan de Chachacomani y Villa Asunción de Corpaputo al este, la ciudad de Achacachi es la capital de la Provincia Omasuyos y es el centro de las actividades administrativas y económicas de la provincia, se encuentra ubicada en el altiplano norte, a una distancia de 80 Km de la ciudad de La Paz.

Esta problemática se procede con la aplicación del modelo SWAT para la simulación de caudales mensuales, verificando su aplicabilidad y eficiencia en la cuenca del río Keka.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- ✓ Aplicar el modelo SWAT (soil and wáter assessmet tool) para simular caudales mensuales con fines agrícolas en la cuenca del Río Keka.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar el modelo SWAT (soil and wáter assessmet tool) para calcular los caudales mensuales de la Cuenca.
- ✓ Calibrar y comparar los resultados de caudales reales observados en la Cuenca del Río Keka.
- ✓ Evaluar la Cuenca de Río Keka con fines agrícolas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cuenca Hidrológica

Cuenca es un área de captación natural de agua de lluvia que converge escurriendo a un único punto de salida. La cuenca hidrográfica se compone básicamente de un conjunto de superficies vertientes a una red de drenaje formada por cursos de agua que confluyen hasta resultar en un único lecho colector, Farías (2005).

Ruiz (2010), conceptualiza como unidad natural básica de división territorial de los ecosistemas considerando los límites de escurrimiento que convergen a un cauce común.

Farias (2005), define como un área de captación natural de agua de lluvia que converge escurriendo a un único punto de salida. La cuenca hidrográfica se compone básicamente de un conjunto de superficies vertientes a una red de drenaje formada por cursos de agua que confluyen hasta resultar en un único lecho colector.

Villón (2002), define a una cuenca hidrológica como un área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

2.2 Recursos Hídricos

El agua es uno de los recursos más importante para la vida del hombre, tiene injerencia en diversos campos: Social, cultural, económico (agricultura, acuicultura, ganadería), político, etc. Cabe mencionar que el desarrollo político y económico de una región dependerá en muchos casos de las decisiones y de una adecuada gestión Farías (2005).

Los recursos hídricos son útiles para el consumo humano, riego, energía, transporte, pesquería, turismo, etc. Consiguientemente, en caso de limitaciones, su empleo para uno de estos fines, puede reducir su uso para otros (ZONISIG, 2001).

Todos los ríos van al mar, y el mar no se llena. Al lugar de donde vienen los ríos, allí vuelven para correr de nuevo es reportado por, Valera (1602).

2.3 Modelación Hidrológica de Cuencas

La hidrología trata de fenómenos naturales complejos encontrados en el ciclo hidrológica, los procesos tales como la precipitación, evaporación, infiltración y escurrimiento dependen de un sin número de factores que dificultan su análisis cuantitativo y cualitativa (Parra *et al.*, 2007).

Es así que desde tiempos antiguos el hombre ha tenido la necesidad de estimar varios aspectos del ciclo hidrológico, principalmente para la planificación y diseño de estructuras hidráulicas y para la estimación de eventos extremos que puedan suceder en una cuenca hidrográfica.

La cuenca hidrográfica al ser un sistema natural obliga al hombre a adaptar sus condiciones y conocimientos para poder entender el comportamiento de una cuenca y así poder utilizar más efectivamente sus recursos (Singh, citado por Parra *et al.*, 2007).

Muchas conceptualizaciones de modelos hidrológicos han sido planteadas, una de ellas citada por Auza (2007) dice: Un modelo hidrológico proporciona una forma de transferir conocimiento desde un área media o estudiada a un área donde se requieren decisiones hidrológicas e información.

2.4 Clasificación de los Modelos Hidrológicos de Cuencas

Los modelos pueden ser de diferentes tipos y haber sido desarrollados con diferentes propósitos, la superposición de estos, muestra que algunos de ellos comparten muchas similitudes estructurales y otros son radicalmente diferentes, no obstante los modelos hidrológicos de cuencas pueden clasificarse en dos grupos (Singh citado por Parra *et al.*, 2007).

- ✓ Según la forma de descripción de proceso
- ✓ Según escalas de tiempo

2.4.1 Clasificación Según la Forma de Descripción del Proceso

Según la descripción de los procesos, los modelos pueden agruparse en dos tipos (Singh citado por Parra *et al.*, 2007):

- **Modelos concentrados** son aquellos que consideran que la variabilidad espacial de las características de la cuenca es significativa y que puede ser representada por un único valor con validez general para la cuenca.
- **Modelos distribuidos** por el contrario toman en cuenta la variabilidad espacial de los parámetros de la cuenca discretizando la misma en Subcuencas, unidades hidrológicas o bien en píxeles.

2.4.2 Clasificación Según Escala de Tiempo

Esta clasificación está regida por el intervalo de cálculo, según la escala de tiempo los modelos pueden dividirse en dos tipos (Singh citado por Parra *et al.*, 2007).

- **Modelos continuos** son aquellos que posibilitan la modelación hidrológica de periodos de tiempo largo e intervalos de cálculo ya sea a nivel anual, otra característica importante es que los modelos continuos representan todos los procesos que intervienen en el balance hídrico a largo plazo, tales como evapotranspiración, infiltración, escorrentías, interflujo y flujo base.
- **Modelos de eventos** por su parte los modelos de eventos están concebidos para representar periodos de tiempo con intervalos de cálculo menores o iguales a una hora.

2.4.3 Modelo Hidrológico Distribuido

Chow (1994), considera que una de las principales aplicaciones que podría darse a los modelos hidrológicos distribuidos, es su utilización para la estimación de la tasa anual de producción de sedimentos en una cuenca.

Este tipo de modelo se enmarca también dentro del grupo dinámico determinístico, porque realiza pronóstico, considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las

dimensiones espaciales. Contempla que los fenómenos hidrológicos varían temporalmente en el tiempo. Requiere ecuaciones diferenciales en el tiempo como variable independiente, que puede mostrar el comportamiento de la variable de respuesta a lo largo del tiempo.

2. 4.4. Descripción de Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos intentan hacer una aproximación de la realidad lo más ajustada posible. Para ello se valen de numerosas simplificaciones en cuanto a la determinación de datos hidrológicos, la distinción entre modelos se da por la capacidad de respuestas hidrológica real, por la gran importancia que se da a los modelos hidrológicos se desarrolló métodos científicos en hidrología para la predicción de la respuesta de cuencas no aforadas, se puede decir que es un gran desafío de futuro (Maldonado, 1990).

GIS-BALAN. (Pisani *et al.*, 2008) describe al modelo como un método de evaluación que resuelve el tránsito de la escorrentía superficial a través de cauces y lagos, con un paso de tiempo diario. La aportación diaria generada en una subcuenca es distribuida en forma homogénea en los cauces y lagos. Para calcular la laminación en cauces el modelo utiliza el método de Muskingum-Cunge.

Consta de tres módulos principales: 1) El preprocesador, que facilita la introducción de datos en el entorno del GIS, 2) El procesador, que calcula el balance y el tránsito superficial, y 3) El post procesador, que permite visualizar los resultados en el entorno del GIS. Los tres módulos comparten entre sí la información almacenada en la base de datos del proyecto, compuesta de dos ficheros Access (*.mdb*) y conjunto de ficheros de texto. Los ficheros Access almacenan la información espacial y los valores de los parámetros, mientras que los ficheros de texto almacenan las series temporales, tanto de entrada como de resultados.

SIMPA. El modelo SIMPA (Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación) está diseñado para la simulación mensual y anual del proceso precipitación aportación y es aplicable a grandes cuencas (Ruiz, 1999). El modelo es de estructura modular, lo que da gran versatilidad. Los módulos componentes son los

siguientes: 1. Definición del proyecto; 2. Visualización de capas de información; 3. Análisis geomorfológico; 4. Análisis de series temporales; 5. Análisis paramétrico; 6. Análisis interanual; 7. Análisis anual; 8. Simulación de aportaciones; y 9. Simulación de crecidas.

El modelo de análisis paramétrico integrado en SIMPA contempla aspectos de especial relevancia para el acoplamiento de un código hidrológico a un SIG.

Incorpora diferentes herramientas que facilitan el establecimiento de relaciones entre parámetros hidrológicos (máxima capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo, capacidad de infiltración, número de curva, umbral de escorrentía) y capas de información sobre características físicas de las cuencas (tipos y usos de suelo, unidades hidrogeológicas, geología, etc.). Dispone de tres herramientas generales: a) Reclasificación de los valores en cada una de las celdas de los mapas ráster; b) Cálculo de los valores medios de todas las celdas de una cobertura de polígonos dada; c) Generación de mapas de parámetros mediante combinación lineal ponderada de otros mapas de características. Para obtener un mapa de un parámetro se sigue el siguiente proceso:

MIKE SHE. Es un modelo distribuido basado en leyes físicas (Refsgaard *et al.*, 1995). Modeliza los procesos más importantes del ciclo hidrológico incluyendo la interceptación de la precipitación, la fusión nival, la evapotranspiración, la escorrentía superficial (flujo en ladera y cauce), el flujo subsuperficial en la zona no saturada y el flujo saturado en el acuífero. Una malla ortogonal permite representar la distribución espacial de los parámetros del modelo, las entradas y los resultados.

Se desarrolló para servir como herramienta para evaluar los recursos hídricos en tiempos de rápidos cambios en el uso del suelo y las prácticas agropecuarias. El Instituto Hidráulico Danés (DHI) continuó luego desarrollando el modelo incorporando constantes mejoras en el cálculo y en la interfaz gráfica. También ha desarrollado una interfaz de comunicación entre el código y un GIS.

Uno de los desarrollos más recientes ha sido el acoplamiento del módulo hidrológico de MIKE SHE con el de simulación de flujo superficial MIKE. El resultado es un código integrado de agua superficial y subterránea.

TOPMODEL. Es un conjunto de herramientas de modelización que fueron desarrolladas para simular pequeñas cuencas del Reino Unido (Singh, 1995). Reproduce el comportamiento hidrológico, principalmente de la dinámica superficial y subsuperficial, de manera semidistribuida o distribuida.

En el desarrollo de TOPMODEL se persiguieron tres objetivos: a) Que fuese una herramienta práctica, b) Que fuese un código de simulación continua y de predicción, c) Proporcionar un marco teórico en el cual estudiar los fenómenos hidrológicos, los efectos de escala y los procedimientos del código. Se intentó que el número de parámetros fuera lo menor posible y que fueran físicamente interpretables. Además, se buscó combinar la eficiencia paramétrica del enfoque agregado con la teoría física y las posibilidades del enfoque distribuido. La teoría hidrológica de este modelo es relativamente simple; se intenta que la representación de las respuestas hidrológicas sea lo más funcional posible. Las estructuras del código son modificables, para que el modelizador pueda ajustar las predicciones de acuerdo a su percepción lo mejor posible, habla del modelo “perceptual”, que es propio del modelo hidrológico. La respuesta de una cuenca en TOPMODEL depende de los datos de entrada y de la distribución de los índices. Usaron tres zonas o elementos en la vertical: a) Almacenamiento en depresiones y en el dosel vegetal, b) Almacenamiento en la zona de infiltración, c) Almacenamiento en la zona saturada.

Cuadro 1. Modelos Hidrológicos de Simulación

Características básicas	GIS-BALAN	SISPA	MIKE SHE	TOPMODEL	SWAT
Tipo de modelo	Determinístico, conceptual	Determinístico conceptual	Determinístico, teórico	Determinístico conceptual	Continuo de tiempo
Entorno GIS	SI	SI	SI	En algunas aplicaciones	SI
Intervalo de calculo	Día	Mes	Minutos	Horas	Día, mes, año
Numero de parámetros	Grande	Reducido	Grande	Reducido	Grande
Calibración	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
Almacenamientos	Cubierta nival, suelo edáfico, zona no saturada, acuífero	Suelo edáfico, acuífero	Dosel vegetal, cubierta nival, suelo edáfico, zona no saturada, acuífero	Suelo edáfico, zona no saturada, acuífero	Dosel vegetal, cubierta nival, suelo edáfico, zona no saturada, acuífero
Procesos					
Nieve	SI	NO	SI	SI	SI
Intercepción/ Evaporación	Se calculan separadamente, varias opciones	Se calculan conjuntamente	Modelo de Kristensen-Jensen y otras opciones	Se calculan conjuntamente	Propone tres opciones: Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith
Escoorrentía superficial	Método de Horton y Numero de curva (exceso de infiltración)	Leyes de excedentes e infiltración de Temez (exceso de infiltración)	Numero de curva y otros métodos (exceso de infiltración)	Exceso de saturación	Método de curva numérica de SCS
Flujo no saturado vertical	Método de balance y ecuación de Richards	Ley de infiltración de Temez	Ecuación de Richard o métodos simples	Formulaciones empíricas y semiempíricas	
Flujo hipotético	SI	NO	SI	SI	SI
Flujo saturado	Método simplificado, diferencias finitas 1-D modelos pluricelulares englobados	Ley de descarga exponencial	Flujo saturado 3-D en diferencias finitas	Ley de descarga exponencial	
Tránsito de escoorrentía superficial	Cauces; Muskingum-Cunge, Lagos; método hidrológico	Consta de un módulo de simulación de hidrogramas	Cauces: Muskingum-Cunge o ecuaciones de Saint Venant. Lagos: método hidrológico detallado	Dispone de un método sencillo para simular la laminación en la cuenca	Método de curva numérica de SCS, y método de infiltración de Green y Ampt
Simulación de tormentas	NO	NO	SI	SI	NO
Calidad de aguas	NO	NO	SI	NO	SI

2.5 Descripción del Modelo SWAT (soil Water Assessment Tool)

SWAT son las siglas de herramienta para la evaluación del suelo y agua para una cuenca hidrográfica, el modelo a escala fue desarrollado por el Dr. Jelf Arnold para el USDA el Servicio Agrícola de investigación (ARS), SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las practicas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos, producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelo, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Uribe, 2010).

Torres *et al.*, (2003) describen al SWAT como un modelo basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar ecuaciones regresivas para describir las relaciones entre las variables de entrada y salida; el SWAT requiere de datos específicos acerca del clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo. Esta descripción es corroborada por Neitsch *et al.*, (2002) quien plantea que el modelo SWAT fue desarrollado para predecir las prácticas de manejo de la tierra sobre el agua, sedimentos y productos químicos agrícolas en cuencas con variedad de suelo, uso de la tierra y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo, lo cual es particularmente conveniente para el uso de Subcuencas; donde la información de entrada está agrupada u organizada en las categorías de clima, suelo, uso de la tierra, lagunas (estanques/humedales), etc. De esta manera se definen las unidades de respuesta hidrológica (URH) o área de terreno que están constituidas de un solo tipo de cobertura, suelo, topografía del terreno y condiciones de campo o de manejo.

La simulación de la hidrología de una cuenca con la utilización del modelo SWAT puede ser separada en dos divisiones principales: fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de tránsito o líquida.

Fase terrestre: controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas descargados en el cauce principal en cada subcuenca. El modelo simula el ciclo hidrológico según la ecuación 1 del balance hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - |Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}|) \quad \text{Ecuación... (1)}$$

Donde:

SWt = Es el contenido de agua en el suelo en el día t

SW = Es el agua aprovechable por las plantas

t = Es el tiempo en días

R = Es la precipitación diaria

Q = La cantidad de escorrentía diaria

ET = La evapotranspiración diaria

P = La percolación diaria

QR = El flujo de retorno o flujo base

La asignación de subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en evapotranspiración para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada URH y se transita para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto incrementa la precisión y da una mejor descripción física del balance de agua (Neitsch *et al.*, 2002).

Fase líquida: Esta fase comprende el movimiento del agua, sedimentos, a través de la red de canales o cauces en la cuenca hasta su salida o punto de aforo. El desplazamiento en el cauce principal puede dividirse en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas.

Agua: Con el flujo del agua pendiente abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del cauce. Otra pérdida potencial se debe a la remoción del agua del cauce para uso agrícola o humano. El caudal puede ser suplementado por la lluvia caída directamente sobre el cauce y la proveniente de fuentes puntuales. El flujo es dirigido a través del cauce usando un método variable de coeficientes de almacenamiento.

2.6 Uso de la Tierra

Después que el hombre se hizo sedentario, reconoció que ciertas unidades de tierra tenían diferentes respuestas frente a las plantas cultivadas, debido a la presencia de algunas características del medio físico. Este conocimiento empírico determinó, que gran parte de las florecientes y prósperas culturas antiguas se asentaron zonas con

suelos muy fértiles, especialmente planicies aluviales jóvenes, desde el punto de vista del tiempo geológico. Sin embargo, esta relación, aparentemente obvia, no fue clara para muchos y aún hoy día no lo es. Por su parte se considera la tierra como un concepto que cobija el ambiente físico incluyendo el clima, el suelo y la geología subyacente, hidrología, población vegetal y animal y los resultados de la actividad humana pasada y presente, en la medida que estos atributos ejercen una influencia significativa sobre los usos presentes y futuros de la tierra por parte del hombre. Es entonces, el uso de la tierra, la explotación o empleo de la misma por parte del hombre.

Por ser el concepto tierra tan amplio, las posibilidades de utilización de la misma son muy variadas. Sin desconocer que el planeta posee unas condiciones que aseguran la existencia de la vida, la tierra se considera mayormente por el espacio físico en donde se desarrolla la producción biológica (especialmente el suelo), por la posibilidad de construcción de asentamientos e infraestructura; además, por la producción, almacenamiento y circulación de agua (ciclo hidrológico) y por la existencia de combustibles y minerales (Santana, 2000).

2.7 Propiedades Físicas del Suelo

2.7.1 Textura

Porta *et al.*, (1994) hace énfasis en el interés de conocer este parámetro ya que permite inferir en otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo:

- ✓ Capacidad de retención de agua disponible y de suministro para las plantas y la facilidad de circulación del mismo (velocidad de entrada y salida).
- ✓ Facilidad de laboreo, el riesgo de formación de costra superficial y el riesgo a la erosión ya sea hídrica o eólica.
- ✓ Capacidad de almacenar nutrientes y admitir aguas residuales y otros.

2.7.2 Densidad Aparente

Existe una relación clara entre el valor de la densidad aparente con otras propiedades y características del suelo; entre estas se destacan la textura, contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación-compresión, la conductividad térmica y la resistencia del suelo a la penetración, (Narro 1994). El mismo autor indica que valores menores o bajos son los más apropiados para los cultivos desde el punto de vista agrícola.

En los resultados obtenidos por estudios, el altiplano boliviano presenta una densidad aparente alrededor de 1.49 g/cm^3 , con una consistencia ligeramente dura, (Chilon 1997).

2.7.3 Muestreo de Suelo

En la toma de muestras, se debe tener en cuenta las variaciones del suelo, de acuerdo con la profundidad del perfil y el área del terreno; siendo los casos más comunes los siguientes: Muestreo de perfil del suelo, muestreo de la capa arable o superficial del suelo, muestreo de parcelas experimentales, muestreo de terrenos en haciendas o grandes explotaciones, (Porta *et al.*, 1994).

2.8 Determinación de Caudales en la Cuenca

Según Osorio *et al.*, (1994), los métodos de aforo de corrientes de agua se basan, generalmente, en el uso de una ecuación de gasto ya sea en forma directa o indirecta. En el primer caso, se necesita determinar previamente la velocidad media o el campo de velocidades correspondiente a una sección transversal de la corriente.

2.8.1 Método del Molinete

Se puede aforar una corriente midiendo, mediante aparatos adecuados (molinete y tubos), la velocidad del agua en un número suficientemente grande de puntos a fin de determinar la superficie de caudal y, posteriormente, el caudal de la corriente. Para que se den las condiciones hidráulicas expuestas, la sección de medidas debe venir precedida de un tramo recto de sección homogénea suficientemente largo. Los

molinete consisten en una hélice o en varias cazoletas que giran al ser interpuestas en una corriente ver figura 1. (Roldan 2007).



Figura 1. Molinete

2.9 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Fedra, citado por Hernández (2003) define los SIG como herramientas basados en sistemas de cómputo para capturar, procesar y desplegar datos espaciales o georeferenciados. Conteniendo datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos o información que describe las propiedades de objetos geométricos como puntos, líneas y áreas.

Desde el punto de vista hidrológico Maidment (1993), considera que los SIG proveen representaciones de las características espaciales de la tierra, que la modelación hidrológica se ocupa de los flujos de agua y sus constituyentes sobre la superficie terrestre y el ambiente subsuperficial; existe entonces, una obvia y cercana conexión entre ambos. En este contexto, el autor explica que los SIG proveen a los modelos hidrológicos el potencial de incrementar el grado de definición de las subunidades espaciales en número y detalle descriptivo. Así mismo, éste enlace permite la evaluación de procesos a escala regionales cuya hidrología no podría haberse modelado de otra forma.

Arguello, citado por Portilla (1994) no difiere al referirse a los modelos hidrológicos como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico. Mientras que los SIG proveen la tecnología para almacenar y manipular la información espacial relacionada que es demandada por los modelos hidrológicos (Moore, citado por Portilla 1994).

Un modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia cartográfico, creado y manejado mediante herramienta computacional y establecida para determinados objetivos y necesidades de información del territorio, capaz de responder un conjunto de preguntas específicas, que a la vez pueden ser dinámica (Escobar *et al.*, 1994).

Un SIG es un “Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos especialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (Berry *et al.*, 1981).

Los (SIG) han significado una verdadera revolución conceptual y práctica en el manejo y análisis de información geográfica (Bosque *et al.*, 1994).

2.10 Necesidades de Riego en Bolivia

Las regiones que por sus características climáticas presentan un mínimo de 6 meses de déficit hídrico a año, en las cuales la escasez de agua representa el obstáculo mayor para el desarrollo de los cultivos, la cual hace necesario la aplicación del agua del riego. Las zonas agroecológicas identificadas con déficit hídrico son aquellas cuyos niveles de precipitación son menores a la evapotranspiración. Estas regiones representan alrededor del 40% del territorio nacional (PRONAR, 1998).

Cuadro 2. Zonas agroecológicas con déficit hídrico

Zonas Agro ecológicas	Superficie (km ²)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Déficit (mm)	Meses Secos
Altiplano Norte	13600	550	958	444	9
Altiplano Central	91100	357	719	362	9
Altiplano Sur	73900	306	665	359	9
Valles Cerrados	21950	666	999	333	7
Valles del Norte	46350	483	935	452	8
Valles Centrales	35000	651	985	334	7
Valles del Sur	44000	614	982	368	7
Llanos del Chaco	122500	751	1655	904	10
Total	448700				

Fuente: PRONAR “Informe Principal” (1998)

Como se puede observar en los datos del cuadro 2, en todos los casos se presenta déficit hídrico con periodos secos que van desde 7 meses en los valles, hasta el caso extremo de 10 meses en el Chaco. De esta manera, las zonas agro ecológicas con marcado déficit hídrico, conforman una región de zonas áridas y semiáridas del país, situadas en la parte sudoeste del territorio nacional (PRONAR, 1998).

2.10.1 El Riego

El riego es el proceso de aplicar artificialmente el agua al suelo en cantidades adecuadas y oportunamente, para contrarrestar la evapotranspiración y sustentar las necesidades de los cultivos, para su desarrollo vegetativo normal y producir óptimamente. El riego es básicamente una tentativa del hombre para alterar el ciclo hidrológico a nivel local y promover un incremento de la producción agrícola. El riego es el suministro oportuno de la cantidad adecuada de agua a los cultivos, de tal manera que estos no sufran disminución en sus rendimientos y sin causar daños al medio ambiente, para lo cual debemos respondernos básicamente tres preguntas: ¿Cuándo regar?, ¿Cuánto regar? y ¿Cómo regar?, así mismo el agua aplicada al suelo esta determinado por el tipo y manejo del sistema, generalmente cuando se trabaja con sistemas de riego por superficie se requieren mayores cantidades comparadas con los sistemas de riego presurizado y localizado (Chipana, 2003).

2.11 Caudal Ecológico

Se denomina caudal ecológico al volumen mínimo de agua por unidad de tiempo que puede escurrir en forma superficial por un curso fluvial, capaz de garantizar la vida acuática fluvial actual y los usos ya establecidos; siendo actualmente un requisito para la aprobación de proyectos de riego. El caudal ecológico, es el agua para preservar valores ecológicos; los hábitats naturales que cobijan una riqueza de flora y fauna, las funciones ambientales como purificación de aguas, amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos, los parques naturales y la diversidad de paisajes. Esto implica que después de los usos de agua para: consumo humano, aprovechamiento agrícola e industrial se debe mantener un caudal para la naturaleza, que sirve para conservar la biodiversidad y las funciones ambientales (PRONAR, 2003).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Los materiales empleados para el presente trabajo de investigación son:

3.1.1 Equipos y materiales para el proceso de imágenes

- ✓ GPS (Sistema de Posicionamiento Global).
- ✓ Aforador (medición de caudales).
- ✓ Barreno helicoidal (perforador): de 0.05m (diámetro).
- ✓ Cámara Fotográfica.
- ✓ Análisis Físico (Textura).

3.1.2 Equipos de gabinete

- ✓ Computadora para procesamiento de imágenes satelitales.
- ✓ Programas SIG Sistema de Información Geográfica (ArcView 3.2, Arcgis 9.3).
- ✓ Materiales de escritorio en general.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

3.2.1 Localización

El presente estudio se llevó a cabo en la Provincia Omasuyos y los Andes, zona altiplano norte del Departamento de La Paz, geográficamente situado entre los paralelos 16° 03' 00" de latitud sur y 68° 11' 00". longitud oeste, rango de altitud 3371 a 6194 msnm, la cuenca del río Keka cubre una superficie de 1049.690 km²

3.2.2 Características climáticas

Para describir las condiciones climáticas se obtuvo datos de 10 años procedentes a la gestión (2003 a 2012), datos correspondientes a la estación de El Belén, ubicada en 16°04'00" latitud Sur y 68°40'00" Latitud Oeste, altura de 3820 msnm, estación más cercana al área de estudio por la disponibilidad de datos meteorológicos.

Comportamiento térmico. La característica de la zona es semiárida y fría, descrita por Montes de Oca 1995, cómo templada y seca, presenta temperaturas anuales promedio de 7.1 °C, que varían entre 0.5 °C bajo cero y 14.6 °C.

Comportamiento pluvial. La precipitación anual promedio en el área de estudio se estima en 461.4 mm en base al registro de precipitación de la estación El Belén.

Fisiografía y Topografía. Se encuentra en el bloque andino elevado y frío. La topografía presente es suavemente ondulada, alternada con serranías de pendientes moderadas a escarpadas (empinadas), alturas que sobrepasan los 3600 msnm, fisiográficamente se denomina gran paisaje Serranías y Pie de Montes, del Altiplano Norte.

Geología. La geología presente de la zona es la acumulación de sedimentos cuaternarios en un antiguo lacustre, interrumpida por serranías inter-altiplánicas de edad mayormente terciaria.

Suelos. Características: cuenca superior, son suelos superficiales con un solo estrato de textura media moldeada por grava y piedras en estratos más profundos, son excesivamente drenados. Cuenca media: siendo estas superficiales con una baja retención de humedad. Cuenca inferior: los suelos de esta área corresponde a suelos de topografía plana, son moderadamente desarrollados y moderadamente profundos de textura finas son suelos abigarrados en estratos más profundos estos son suelos con una buena retención de humedad.

Vegetación. La vegetación que cubre dicha zona es una cobertura herbácea, matorrales, de estrados medios a bajos, inclusive existe áreas desnudas. Las familias que incluyen el mayor número de especies son la Gramineae (46%) y Compositae (34%). Mucho menos representadas están las especies de las familias Leguminosae (10%), Cyperaceae (4%), Juncaceae (3%) y Chenopodiaceae (3%).

Hidrología. El área de estudio se extiende junto con el río Keka que tiene tres tributarios dentro del área del estudio; a saber: río Corpa, Japa Jahuirá y Chiar Jorko desde los tramos superiores del curso del río. Debido a la infiltración del flujo en el

lecho del río, se puede observar vertientes en el tramo medio del cuerpo del río Keka. Durante la temporada seca, no hay flujo de agua en los ríos Corpa y Japa Jahuirá debido al uso de agua para riego en los tramos río aguas abajo y la infiltración del flujo al lecho del río, en cuanto al sistema de riego se encuentra más de treinta sistemas de riego que toman agua del río Keka para el aprovechamiento de este recurso tan importante.

ÁREA DE ESTUDIO

UBICACIÓN DEL ÁREA DE INTERÉS

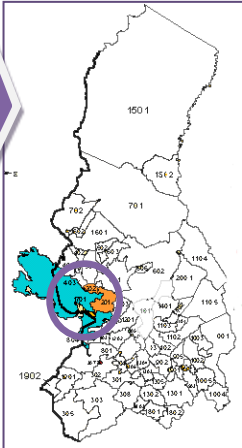
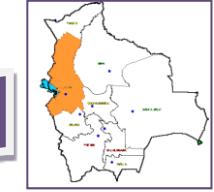
CUENCA DEL RIO KEKA

**REPUBLICA DE
BOLIVIA**

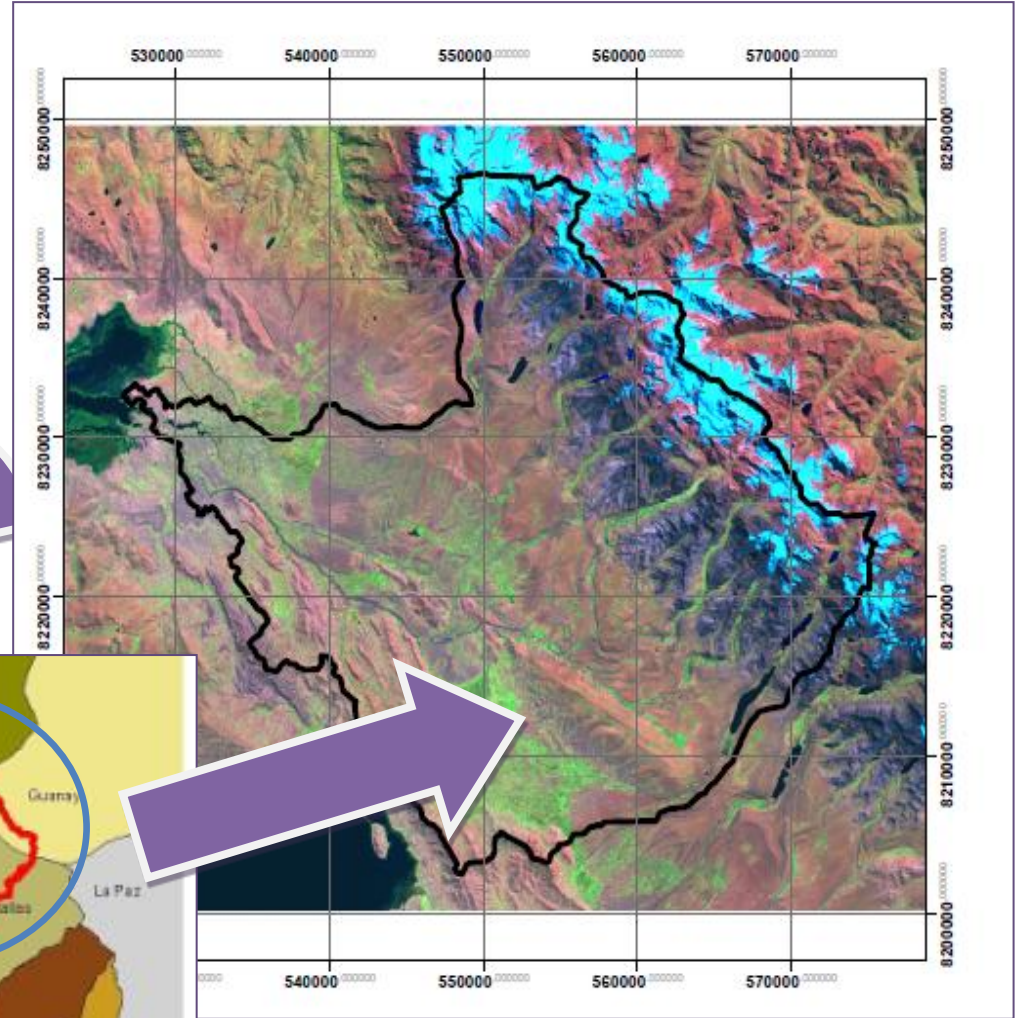
Mapa N° 1 Mapa de ubicación y
delimitación de la cuenca de río Keka

Fuente: Elaboración propia

CUENCA DEL RIO KEKA



**DEPARTAMENTO DE
LA PAZ**



3.3 Metodología

La metodología que se realizó en presente trabajo de investigación tiene tres partes una compilación de datos preliminares, campo y otra de gabinete que se detalla a continuación:

3.3.1 Recopilación de Información secundaria

Se procedió a la recopilación de información secundaria de trabajos que se realizaron en la zona de estudio como PDM (Plan de Desarrollo Municipal), de Achacachi (2010-2014), JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón), MIC (estudio técnico, económico, social y ambiental - plan de manejo integral de la cuenca del rio Keka). Al mismo tiempo se investigó otra documentación como tesis de grado, artículos, con la finalidad de recabar información adecuada a los propósitos del presente trabajo.

3.3.1.1 Evaluación Climática

Para la evaluación climática del área de estudio se consideró la estación meteorológica de El Belén, dándose mayor interés a esta por ser la más próxima al área de Estudio. Esta información fue obtenida por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) en las gestiones 2003 y 2012, para su uso en el programa SWAT. En el cuadro 3 se presenta la estación que se utilizó como entrada de información al modelo.

Cuadro 3. Estación meteorológica utilizada en el modelo

NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN	PRECIPITACIÓN DIARIA	TEMPERATURA DIARIA
BELÉN	16 °1'0"	68° 40'0"	3820	X	X

Los datos de precipitación y temperaturas diarios que fueron obtenidos por el SENAMHI, son registros diarios completos, por lo tanto no existió la necesidad de realizar procesos matemáticos para el cálculo de datos faltantes.

3.3.1.2 Información Hidrológica

Para el presente trabajo se han utilizado datos hidrológicos de la estación de Achacachi que se encuentra en el municipio de Achacachi 16°04'00" latitud Sur y 68°67'00" Latitud Oeste, los datos de caudales observados han sido obtenidos de la estación limnométrica

de Achacachi. En el cuadro 4 se presenta la estación que se utilizó como datos reales con los datos simulados del modelo.

Cuadro 4. Estación hidrológica utilizada en el modelo

NOMBRE	VARIABLE	FUENTE	PERIODO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
ACHACACHI	Caudales	SENAMHI	2003-2012	16°04'	68°67'	3820

Los datos de caudales diarios que fueron entregados por el SENAMHI, son registros diarios completos, por lo tanto no existió la necesidad de realizar procesos matemáticos para el cálculo de datos faltantes.

3.3.2 Reconocimiento del Área de Estudio

En primera instancia se ubicaron las áreas de estudio a través de visitas a campo, juntamente con el equipo técnico del proyecto, se definió y seleccionó los puntos de aforo y muestreo de suelos (textura) de la Cuenca de río Keka.

Para la obtención de imágenes satelitales se trabajó con páginas de internet y otras imágenes que el proyecto proporcione para el presente estudio; Mediante imágenes satelitales Landsat 5TM (Thematic Mapper), también se trabajó con el software Google Earth, mediante internet para la corroboración e identificación de la Cuenca.

3.3.2.1 Trabajo de Campo

Durante esta etapa se trabajó con la toma de datos caudales, muestreo de suelos, consecutivamente se pudo observar el tipo de vegetación del lugar de estudio para la actualización del mapa de cobertura vegetal.

3.3.2.1.1 Determinación de Caudales

Con el fin de determinar el caudal de la cuenca del río Keka, se seleccionó el método indicado por Amurio (2003) en base a la velocidad del agua y el área de sección del canal, como se aprecia en la siguiente ecuación (2), debido a los elevados caudales.

$$Q = V * S \quad \text{Ecuación... (2)}$$

Donde:

Q: Caudal de agua (m³/s)

V: Velocidad de agua (m/s)

S: Sección del canal de conducción (m²)

En base a esta ecuación y para una medición más precisa, el aforo del río principal de la cuenca fue realizado por el método de molinete, como se observa en la figura.



Figura Nº 2. Medición de Caudal Método Molinete

3.3.2.1.2 Muestreo de suelos

Para determinar las características físicas del suelo, se tomó muestras aleatorias de suelo, no alteradas (volumen de 100 cm³) con una profundidad de 20 a 40 cm para luego ser analizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés.



Figura Nº 3. Muestreo de Suelo (Método Barreno)

3.3.3 Fase de Gabinete

En esta etapa se ordenó los resultados obtenidos en la fase de campo, además se analizó la información secundaria como ser: datos climáticos de (SENAMHI), se analizó mapas, reportes de laboratorio de suelos (ZONISIG), de esta manera se logró obtener la información requerida por el programa SWAT.

3.3.3.1 Fuentes de información utilizada en el modelo SWAT

La información utilizada para la aplicación al modelo SWAT fue recolectada por varias fuentes de investigaciones que se realizaron en diferentes épocas y por diferentes instituciones de investigación en la cuenca del Rio Keka se menciona a continuación cada una de ellas.

Cuadro 5. Fuentes de Información Seleccionada Inicialmente

CUENCA DEL RIO KEKA	
Cobertura	Coberturas Generales a Escala 1:180.000, Cartas del MIC, plan de manejo integral de la cuenca del rio Keka
Suelos	Suelos Generales a Escala 1: 180.000 clasificada por unidad de terreno (ZONISIG, JICA y MIC del rio Keka 2008)
DEM	(MMAyA) Ministerio de Medio Ambiente y Agua
Cartografía Base	Drenajes, Centros poblados, División política administrativa, Nevados etc. (ZONISIG, JICA y MIC del rio Keka 2008).

Fuente: Elaboración Propia (2013)

3.3.3.1.1 Datos geográficos

La información básica principalmente son mapas: en formato digital ArcGis File.

- ✓ Modelo Digital de Elevación.
- ✓ Mapa de cobertura con sus respectivos atributos y leyendas.
- ✓ Mapa de suelos clasificada por unidad de terreno con sus respectivos atributos y leyenda.

3.3.3.2 Descripción del Proceso Realizado en el Programa SWAT

Tomando en cuenta toda la información recolectada se elaboró la base de datos con archivos modelo dentro de la interface ArcGis/SWAT.

3.3.3.2.1 Proceso cartográfico

La cartografía digital requerida por SWAT fue homogenizada con los siguientes parámetros: escala 1:300.000, proyección Transverse Mercator Projected Coordinate Sistema: WGS_1984_UTM_Zone_19S. La cartografía utilizada se describe a continuación:

Modelo digital de elevación (MDE): Se utilizó el MDE del (MMAyA) Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Una vez que se han configurado los mapas se introdujo al programa haciendo combinaciones para cada uno de ellos: Con el MDE se crea la red de drenaje además delimita el área de la cuenca, con esta información se genera el mapa de subcuencas a partir de un área mínima definida en relación a la escala de trabajo.

Mascara del área de estudio: La máscara se generó considerando, en su totalidad, la superficie de la cuenca del río Keka. La máscara en formato raster, permitió que los cálculos del modelo SWAT se concentraran específicamente en la zona de estudio.

Mapa de Cobertura: Se utilizaron los datos de los mapas del Plan de Manejo Integral de la Cuenca río Keka, en el año 2008 a escala 1:180.000. En este estudio, los mapas se encuentran con atributos y leyendas. Donde contiene el código presentado por el programa que representa cada una de las unidades de uso y cobertura, se convierte a

formato raster y se crea su tabla adicional con su respectivo código para su ingreso al programa.

Mapa de suelos: Fue clasificado por unidad de terreno la información utilizada fue extraída del (ZONISIG, JICA y MIC del río Kekaa 2008), para su uso en el programa este mapa contiene el código que presenta el programa y define cada una de las unidades de suelo del mapa, debe de ser de tipo raster, donde cada unidad se encuentre bien definida. Adicionalmente se elaboró una tabla donde se relacionan cada uno de los códigos de los tipos de suelo con un código interno que es creado dentro del SWAT.

A medida que se cargan los mapas sucede un proceso de enlazamiento entre los mapas de cobertura con el de suelos para definir lo que se denomina dentro de la terminología de SWAT como Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Las URH son las unidades que resultan del enlazamiento es de un determinado suelo con un sitio de cobertura dentro de una subcuenca, este resultado representa la unidad mínima de detalle del SWAT.

3.3.3.2 Ingreso de información Hidroclimática

Para ingresar la información hidroclimática se modificaron los datos de acuerdo a la estructura interna del ArcGis 9.3 / SWAT, está dada por mes, día, año, y con el nombre de PCP en el caso de la precipitación y mes, día, año, MAX, MIN en el caso de la temperatura, para ambas se guardan en archivos de formato DBF. Además de la información diaria es necesario ingresar al generador de clima información estadística adicional calculada en base a datos de las estadísticas meteorológicas. Esta información es la siguiente

- Latitud de la cuenca (UTM).
- Longitud de la cuenca (UTM)
- Elevación de la cuenca (m).
- Promedio de la precipitación (mm)
- Promedio de temperatura máximo de aire mensual (°C).
- Promedio de temperatura mínimo de aire mensual (°C).

Toda esta información es procesada internamente por el SWAT y se combina por medio de HRU Y subcuencas.

3.3.3.2.3 Simulación y calibración en el modelo SWAT.

Para calibrar un modelo se debe seleccionar alguno de los aspectos del comportamiento de la cuenca, generalmente se selecciona los registros de descargas o hidrógrafas registrados por estaciones localizadas en la cuenca. La calibración es un proceso de ensayo de prueba y error de ajuste de parámetros, después de que cada parámetro ha sido ajustado los caudales observados y simulados son comparados empleando alguna fórmula para la estimación del error por ejemplo puede citarse el error cuadrático o bien el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe procurando que el valor obtenido sea el mínimo posible o que presente la mayor eficiencia respectivamente,

Los parámetros utilizados para el ajuste de la calibración son: el Número de Curva en condición II (CN II), Factor Alfa para el flujo base (ALPHA_BF) y el factor de compensación del suelo (ESCO), por ser de mayor sensibilidad en la producción de caudal líquido en los meses de junio, julio y agosto (Zarate, 2004).

Cuadro 6. Parámetros para la calibración de caudales del programa SWAT

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
CN	Número de Curva
ALPHA_BF	Factor Alfa para el flujo base
ESCO	Factor de compensación del suelo

Fuente: Zarate (2004)

Metodología utilizada para el trabajo de investigación del programa SWAT presentado en el siguiente Flujo grama donde se muestra cada uno de los pasos realizados.

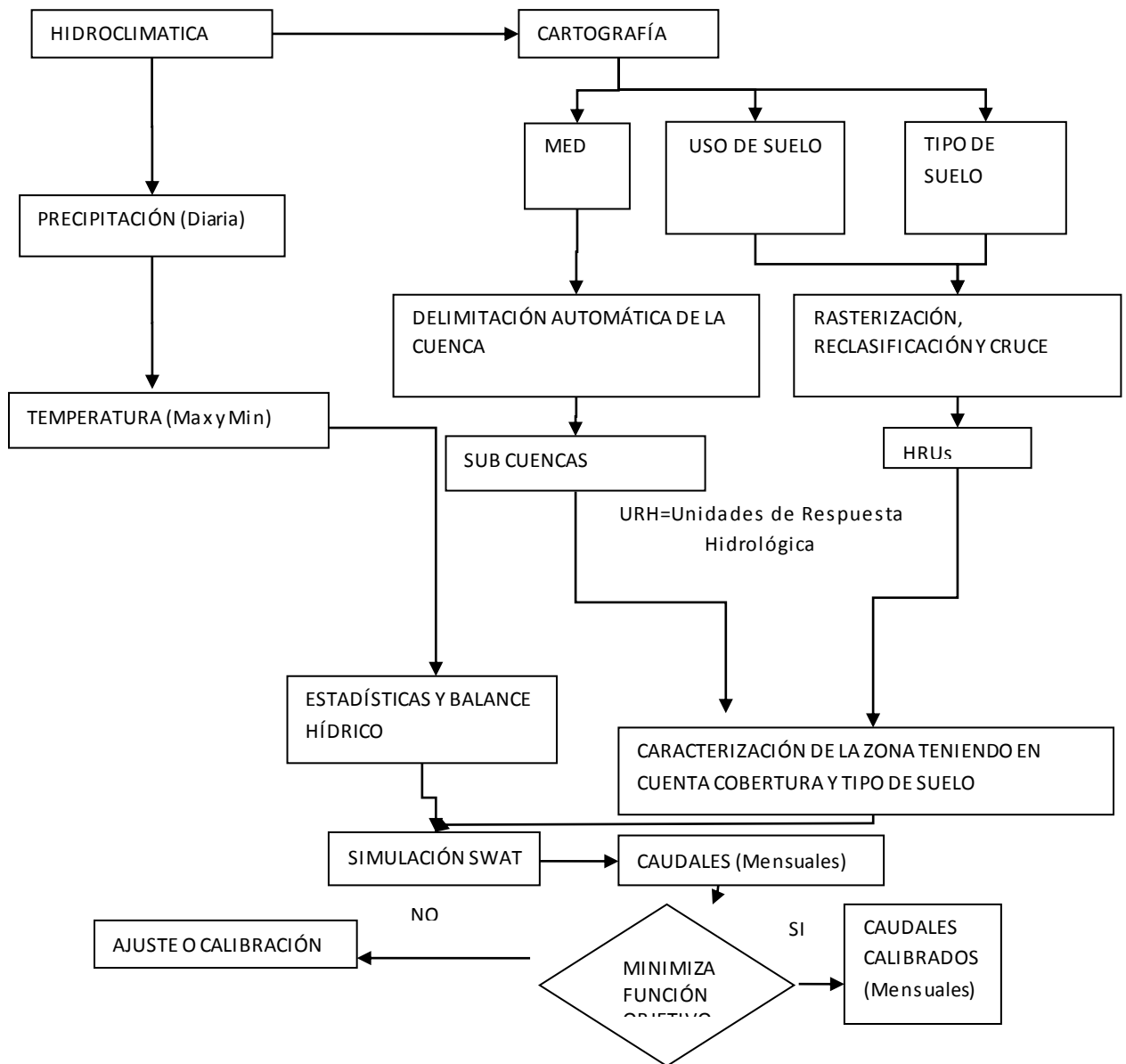


Figura 4. Flujo grama de la simulación de caudales con el programa SWAT,

4. RESULTADOS

4.1 Aplicación del modelo SWAT

4.1.1 Preparación de la información meteorológica

La información meteorológica es muy importante al momento del ingreso al programa, en cuanto a los parámetros faltantes que requiere el programa fueron simulados con ayuda de su generador de clima. Para el funcionamiento de este generador, es necesario calcular estadísticas mensuales en función de datos meteorológicos recolectados. Estas estadísticas fueron calculadas para la estación de El Belén y son mostradas en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros utilizados en el Generador de clima SWAT

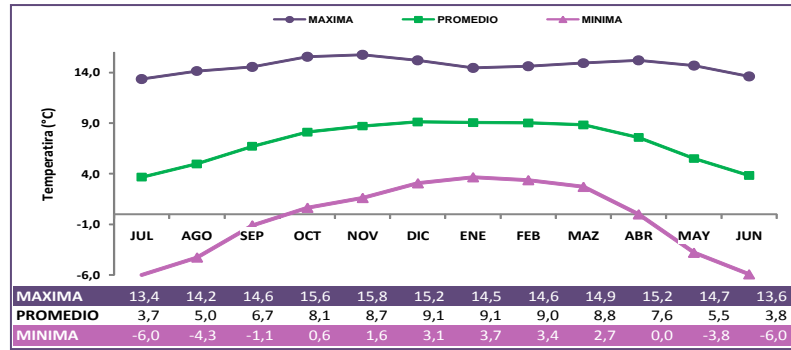
TMP_MED	Promedio de temperatura mensual (°C).											
TMP_MAX	Promedio máximo de temperatura mensual (°C).											
TMP_MIN	Promedio mínimo de temperatura mensual (°C).											
TMP_CV	Coeficiente de variación para el promedio de temperatura.											
PCPD	Promedio de número de días de precipitación en el mes.											
PCP_STA1	Promedio diario de precipitación en el mes (mm/día).											
PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TMP_MED	9,1	9,0	8,8	7,6	5,5	3,8	3,7	5,0	6,7	8,1	8,7	9,1
TMP_MAX	14,5	14,6	14,9	15,2	14,7	13,6	13,4	14,2	14,6	15,6	15,8	15,2
TMP_MIN	3,7	3,4	2,7	0,0	-3,8	-6,0	-6,0	-4,3	-1,1	0,6	1,6	3,1
TMP_CV	0,06	0,09	0,13	0,13	0,18	0,20	0,21	0,18	0,11	0,07	0,09	0,06
PCPD	17,48	13,62	11,13	5,69	3,74	1,98	1,92	2,77	5,87	6,98	8,41	13,10
PCP_STA1	5,70	5,12	5,24	3,86	4,13	4,06	3,40	4,19	3,92	4,47	5,11	5,57

Fuente: Elaboración Propia (2013)

a) Temperatura

El comportamiento térmico de la zona es característica de una zona semiárida, clasificada por Montes de Oca como templada y seca.

Presenta temperaturas anuales promedio de 7.5 °C, que varían entre 0.6 °C bajo cero y 14.6 °C. La temperatura mínima baja (- 6.0 °C) y mínima alta (3.7 °C) ocurre en el mes de enero y julio respectivamente y presentan temperaturas máxima baja (13.4 °C), máxima alta (15.8 °C), en el mes de julio y noviembre respectivamente; se detallan el comportamiento térmico de la estación climática de Belén en la siguiente figura 5.



Fuente: Elaboración Propia (2013)

Figura 5. Temperaturas Anuales (2003-2012)

Los datos mensuales de precipitación y temperatura son mostrados en el Anexo 1.

b) Precipitación

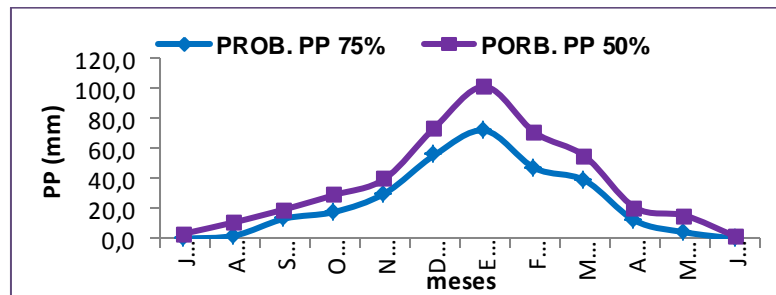
La precipitación pluvial calculada anual alcanza a 461.4 mm, muestra mayor precipitación en el mes de enero (101.1 mm), mientras que menor precipitación se presenta en los meses de junio (1.6 mm), detalle mostrado en el Cuadro 8 y la Figura 6. Presenta seis meses con lluvias considerables (mayor a 30 mm/mes), sumando un total de 374.9 mm, representando el 81.24 % de la precipitación total anual, denominándose época húmeda, mientras que el 18.76% se distribuye en los demás meses, denominándose época seca.

Cuadro 8. Comportamiento pluvial de la zona de estudio

	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.
PROB. PP 75%	0.0	2.0	13.3	17.8	30.1	55.7	71.9	46.9	38.7	12.0	4.2	0.0
PORB. PP 50%	3.4	10.9	19.5	29.1	39.8	73.9	101.1	70.6	54.8	20.7	15.3	1.6

Fuente: SENAMHI, Estación climática E Belén (2003 - 2012).

Probabilidad calculada en base a datos precedentes



Fuente: SENAMHI, Estación climática El Belén (2003 - 2012)

Figura 6. Comportamiento Pluvial de la zona de estudio

4.1.2 Mapas Digitales

Los mapas digitales de tipo de suelo, cobertura, y el modelo digital de elevación, se encuentran en formato ArcGis 9.3 para su introducción al programa.

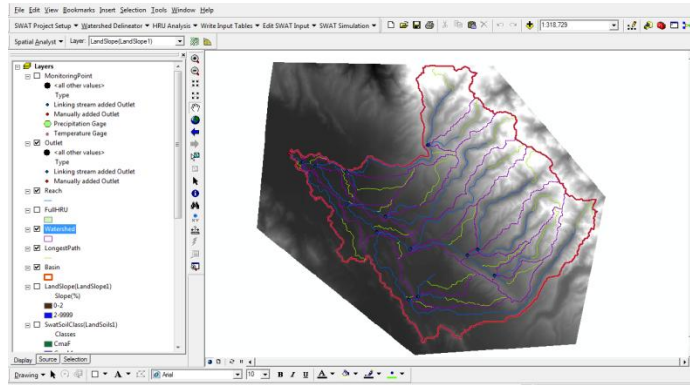


Figura 7. Delimitación automática del programa SWAT

Basado en el (MDE), la cuenca fue delimitada automáticamente de acuerdo al método del programa SWAT, el programa también calculó la dirección de flujo y la dirección de la red de drenaje en función del (DEM), la cuenca fue discretizada en 27 Subcuencas y 208 HRUs (Unidad de respuesta hidrológica) con base en la cobertura y tipo de suelo, para una mejor distribución de las propiedades físicas y los datos meteorológicos. El área calculada de la cuenca del río Keka en los mapas topográficos del manejo integrado de cuenca (MIC) fue de 1000 km², mientras que el área delimitada automáticamente por el programa SWAT fue de 1049.690 km².

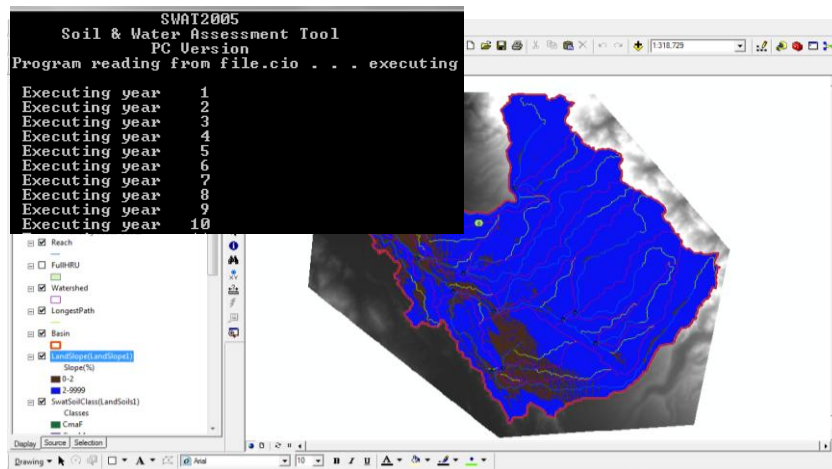


Figura 8. Simulación de caudales mensuales por el programa SWAT

4.1.3 Características de Cobertura de la Cuenca del Rio Keka

El mapa de cobertura fue reclasificado según los símbolos que se presentan en el programa SWAT.

Los símbolos son de la base interna del modelo en cuanto a la cobertura, se muestra en el cuadro 9, el área que ocupa cada uno dentro de la cuenca y el porcentaje que representa.

Cuadro 9. Clases de Cobertura, denominación y porcentaje de Área (%)

COBERTURA KEKA	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	ÁREA(ha)	PORCENTAJE ÁREA (%)
Nevado	Campos de nieve permanente	NIEV	4,399.77	4.22
Valle Glacial	Dispersa de Arbustos en sustrato salinos matas ycojines	AGRR	16,979.78	16.28
Serranía Baja	Cultivos en rotación y producción extensiva	ALFA	13,681.49	13.12
Llanura Fluvioacustre	Vegetación acuátil arraigada en aguas cristalinas no fluyentes	BARL	7,261.56	6.96
Montaña Alta	Dispersa de Arbustos en sustrato rocoso gramíneas y fobias efímeras	FESC	660.89	0.63
Pie de Monte Inferior	Herbácea gramínea césped vivaz turboso saturado plantas pulvinadas	OATS	1,355.19	1.30
Pie de Monte Medio	Matorral siempre verde neblina y garua esclerófila	PAST	1,248.11	1.20
Colina Baja	Cuerpos de agua lagos y lagunas	POTA	3,009.79	2.89
Pie de Monte Superior	Herbácea gramínea amacollada vivaz sinusia arbórea inmutable	SPAS	3,021.39	2.90
Bofedal	Vegetación acuátil arraigada en aguas cristalinas no fluyentes	WETN	33,354.61	31.98
Serranía Media	Herbácea gramínea amacollada vivaz sinusia arbustiva microfila	WPAS	19,325.96	18.53
TOTAL			104,298.55	100.00

Fuente: Elaboración Propia (2013)

El cuadro 9 se observa las clases de cobertura que presenta la cuenca del Rio Keka en él se muestra su nombre, descripción por unidad de terreno, en cuanto al símbolo o código presentado fue utilizado del propio programa SWAT, mediante su base de datos interna, el área mostrado se representa en (ha) esta información se obtuvo de los datos

proporcionados del programa en formato (txt), el área mostrada en porcentaje fue realizado para su mejor entendimiento.

4.1.4 Características Físicas de la Cuenca del Rio Keka

Las clases de suelo fueron incorporadas al programa mediante símbolo para que el programa lo reconozca mediante esos atributos, se puede mostrar el área en (ha) y el porcentaje que ocupa cada uno dentro de la cuenca y el símbolo o código usado por el SWAT, se muestran en el Cuadro 10

Cuadro 10. Clases de Suelo, denominación y porcentaje de Área (%)

SUELO	UNIDADES DE TERRENO	SÍMBOLO	ÁREA (ha)	PORCENTAJE ÁREA (%)
Cordillera	Montana alta con disección fuerte	CmaF	31,507.68	30.21
	Serranía baja con disección moderada	CsmM	18,304.28	17.55
Altiplano	Colinas bajas con disección ligera	CcbL	246.21	0.24
	Pie de monte	Ci	37,197.84	35.66
	Valle glaciar	Cu	10,300.00	9.88
	Llanura coluvio aluvial	Alca	4,965.17	4.76
	Bofedal	Ah	1,777.37	1.70
TOTAL			104,298.55	100.00

Fuente: Elaboración propia (2013).

4.1.4.1 Descripción de los suelos de la zona de estudio



Figura Nº 9. Montaña alta con disección fuerte.

Este paisaje tiene gran representatividad por formar parte de la cordillera Real de Los Andes, ocupando una superficie 31,507.68 (ha) lo que representa 30.21%, del área total y se ubica al norte de área de estudio; siendo así un área extensa, y se caracteriza por presentar cimas agudas con presencia de nieve y hielo permanente.

Suelos. En este paisaje presenta abundante pedregosidad entre grava, rocas y afloramientos rocosos, en cambio en pendiente inferior los suelos son muy superficiales no aptos para la agricultura, con altos contenidos de piedra y grava.



Figura N° 10. Serranía media con disección moderada a fuerte.

Las serranías medias con disección moderada a fuerte, ocupando una superficie de 18,304.28 (ha) lo que representa un 17.55% del área total, presentan cimas agudas, laderas empinadas con afloramientos rocosos y abundante piedra en la superficie.

En las cimas los suelos de esta serranía son muy superficiales, de drenaje excesivo, erosión laminar (severa) y en surcos (moderada); con escasa vegetación nativa. Estas áreas, son superficiales con poca retención de agua; por lo que son usados para pastoreo, debido al paisaje fisiográfico en el que se encuentran (cimas y pendientes de serranías),

Uso actual del suelo. Esta serranía es utilizada para ganadería extensiva como ovina, bovina y agricultura complementaria, pero las partes con afloramiento rocoso no presenten ningún uso.



Figura N° 11. Colina baja con disección ligera

Las colinas medias con disección ligera, están ocupando una superficie de 246.21 (ha) lo que representa un 0.24% del área total, los suelos de estas colinas presentan suelos superficiales, son bien drenados por presentar los suelos pedregocidad y gran porcentaje de arena y limo.

Uso actual del suelo. Esta unidad de terreno está siendo utilizada como ganadería extensiva de ovinos, bovinos y llamas.



Figura N° 12. Pie de monte

El terreno de Pie de Monte ocupa una superficie de 37,197.84 (ha), lo que representa un 35.66 % del área total, los suelos de este paisaje son poco profundos, bien drenados por la gran cantidad de material rocoso, problemas de erosión laminar (leve).

Uso actual del suelo. Los suelos de Pie de monte son utilizados para la ganadería extensiva de ovinos, bovinos y llama.



Figura N° 13. Valle glaciar

Este suelos se encuentran en cabecera de valle, ocupa una superficie de 10,300.00 (ha), lo que representa un 9.88% del área total, son suelos moderadamente profundos, imperfectamente drenados, sin presencia de erosión, gracias a la abundante vegetación que cubre la mayor parte del suelo.

Uso actual del suelo. El uso que se le da a estos valles es de ganadería extensiva de ovinos, llamas y en bajas proporciones alpacas.



Figura N° 14. Llanura Coluvio Aluvial

La llanura Coluvio Aluvial ocupa una superficie de 4,965.17(ha) lo que representa un 4.76% del área total, los suelos de esta lugar presentan buenas condiciones para los cultivo ya que tienen un buen almacenamiento de agua.

Gracias a las condiciones topográficas, abundante vegetación, favorecen a la resistencia contra la erosión hídrica y eólica.

Uso Actual del suelo. Los suelos de este paisaje son utilizados para la agropecuaria extensiva con ovinos, vacunos con forrajes, papa, cebada y otros cultivos.



Figura N° 15. Bofedales

Los Bofedales ocupa una superficie de 1,777.37 (ha), lo que representa un 1.73% del área total, los suelos de los bofedales, son moderadamente profundos, escasamente drenados, presenta pendiente menor al 2%, sin presencia de erosión y abundante vegetación hidromórfica, por la de retención de agua que presenta esta unidad de terreno, estos suelos

son también llamados como esponjas por los comunarios que habitan cerca de estos bofedales.

Estos suelos son adecuados para el desarrollo de los cultivos, con una fertilidad natural alta, pero estos suelos no deben ser utilizados para la agricultura, hay que respetar la aptitud de uso que es exclusivamente de pastoreo.

Por otra parte se puede decir que son reservorios de agua porque son como esponjas recolectoras de agua, y que en época seca irán a verter parte del agua almacenada a los ríos lo cual podrá ser aprovechado para los cultivos y al ganado.

Uso actual del suelo. En este paisaje se puede encontrar ganadería intensiva de ovinos y llamas.

4.1.4.2 Características físicas del suelo

Se obtuvieron 20 muestras en catorce Comunidades en la cuenca del Rio Keka las cuales fueron analizadas en el laboratorio de la facultad de Agronomía para determinar la textura del suelo que se muestra en el siguiente cuadro 11.

Cuadro 11. Textura de Suelos en Comunidades de la Cuenca del Rio Keka

N°	COMUNIDADES	A %	L %	Y %	TEXTURA
1	Cruz Loma	61,5	20	18,5	FA
2	Sayhuani Pampa	58,8	22	19,2	FA
3	Barco Belén	42,8	20	37,2	FY
4	Chahuira	24,8	34	41,2	Y
5	Avichaca Alta	32,8	26	41,2	Y
6	Tacamarca	49,8	22	28,2	FY
7	Cutini	50,8	22	27,2	FYA
8	Jiliqui Tankhani	52,8	28	19,2	F
9	Huyo Pampa	61,8	15	23,2	FYA
10	Estancia Pajarani	40,8	26	33,2	FY
11	Puncun Huyo	48,8	20	31,2	FY
12	Chasqui Huyo Pampa	58,8	20	21,2	FYA
13	Sub Cuenca Wila Wilani	56,8	22	21,2	FYA
14	Coromata Media	66,8	6	27,2	FYA

Fuente: Elaboración Propia (2013)

A%=Arena, L%=Limo, Y%=Arcilla, FA= Franco Arenoso, F= Franco, FY= Franco Arcilloso, FYA= Franco Arcilloso Arenoso

4.1.5 Simulación del SWAT

Una vez que todos los datos han sido procesados siguiendo el formato solicitado por el programa se realizó el corrido de la primera simulación, utilizando los valores por defecto del programa SWAT, se obtuvo el hidrógrama mostrado en la Figura 16.

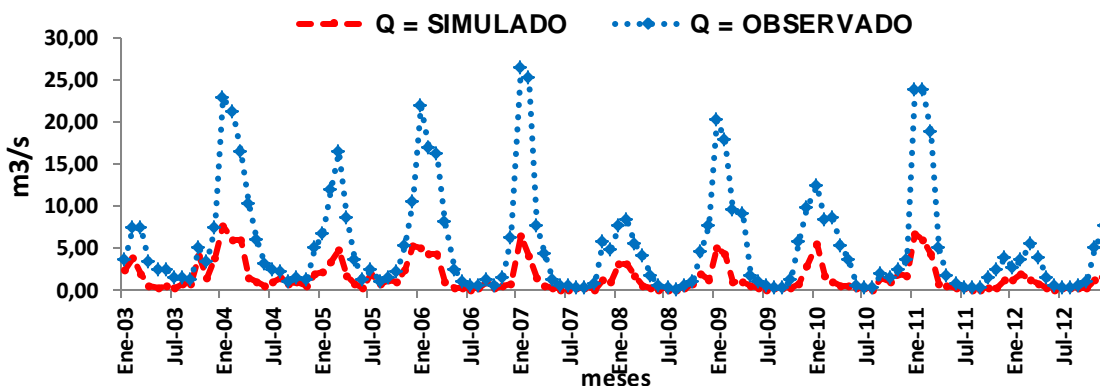


Figura 16. Hidrograma de simulación de caudales (Q= Caudal simulado, Q= Caudal observado) mensuales 2003-2012

Se puede observar en la figura 16, que los caudales descienden a niveles bajos en los meses de época seca (junio, julio, agosto).

A continuación podemos observar en el cuadro 12 los datos de caudales mensuales reales en m³/s obtenidos del SENAMHI, son los datos obtenidos de la estación de Achacachi medidos diariamente por la estación.

Cuadro. 12 caudales mensuales reales en (m³/s) del SENAMHI 2003-2012

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	1.3	3.6	5.4	3.0	2.2	2.0	1.3	0.6	0.3	1.0	2.0	3.7	26.3
2004	15.2	15.1	10.7	8.8	5.0	2.7	1.6	0.7	0.4	0.6	0.6	3.0	64.5
2005	4.6	8.6	11.7	7.1	3.0	0.8	0.4	0.3	0.3	1.1	2.8	5.4	45.9
2006	16.8	12.7	11.8	6.9	2.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	1.1	5.6	58.9
2007	19.9	21.3	6.1	3.8	0.9	0.4	0.3	0.1	0.2	0.5	4.7	3.7	61.9
2008	4.5	5.1	3.8	3.4	1.5	0.4	0.2	0.0	0.1	0.3	2.7	6.4	28.5
2009	15.2	13.4	8.4	8.1	1.3	0.8	0.4	0.1	0.1	0.9	4.8	6.8	60.1
2010	6.7	6.6	7.6	4.7	3.2	0.4	0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	1.7	32.7
2011	17.1	17.7	14.5	4.3	1.2	0.4	0.2	0.1	0.2	1.2	2.2	2.6	61.7
2012	1.4	1.6	4.3	3.3	1.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.7	3.9	6.1	22.8
SUM	102.7	105.7	84.2	53.4	21.6	9.0	5.0	2.3	2.1	7.1	25.3	45.1	463.3
MED	10.3	10.6	8.4	5.3	2.2	0.9	0.5	0.2	0.2	0.7	2.5	4.5	46.3
MAX	19.9	21.3	14.5	8.8	5.0	2.7	1.6	0.7	0.4	1.2	4.8	6.8	64.5
MIN	1.3	1.6	3.8	3.0	0.9	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.6	1.7	22.8
DIAS	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	365.0

En el cuadro 13 se muestra los caudales mensuales simulados obtenidos de la primera corrida, sin previa calibración del programa SWAT, los valores utilizados fueron los que contiene el programa por defecto,

Cuadro. 13 caudales mensuales simulados en (m³/s) 2003-2012 con el SWAT

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	2.3	3.8	1.8	0.4	0.3	0.4	0.1	0.7	0.7	4.0	1.4	3.8	19.7
2004	7.6	6.0	5.8	1.4	0.8	0.4	0.9	1.5	0.6	0.9	0.6	2.0	28.5
2005	2.1	3.4	4.8	1.5	0.7	0.3	1.9	0.6	1.1	1.0	2.5	5.1	24.8
2006	5.1	4.2	4.4	1.0	0.3	0.1	0.1	0.2	0.9	0.3	0.4	0.6	17.5
2007	6.5	4.0	1.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	1.1	0.9	15.2
2008	3.0	3.1	1.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	0.7	1.8	1.2	12.6
2009	5.0	4.3	1.0	0.9	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.8	2.9	16.1
2010	5.5	1.7	1.0	0.5	0.4	0.1	0.1	0.0	1.5	0.9	1.8	1.7	15.4
2011	6.7	6.0	4.3	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	1.1	20.4
2012	1.2	1.9	1.1	0.6	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	1.2	1.6	8.7
SUM	45.0	38.3	27.5	8.1	4.0	1.9	3.5	3.7	5.7	8.6	11.7	20.9	178.8
MED	4.5	3.8	2.7	0.8	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	2.1	17.9
MAX	7.6	6.0	5.8	1.5	0.8	0.4	1.9	1.5	1.5	4.0	2.5	5.1	28.5
MIN	1.2	1.7	1.0	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.6	8.7
DIAS	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	365.0

En la figura 17, se muestra la correlación obtenida a nivel mensual los resultados de los índices obtenidos después de la calibración. El valor del coeficiente de correlación de

Pearson a nivel mensual es de 0.82 reflejando un ajuste entre valores observados y simulados.

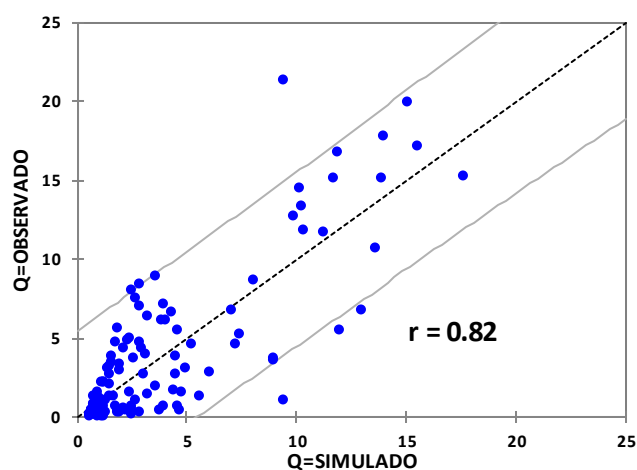


Figura 17. Grado de correlación entre series de caudal mensual observado y simulados con el modelo SWAT.

4.1.5.1 Simulación y Calibración del SWAT

Para la calibración del modelo, los parámetros establecidos por defecto en el programa fueron cambiados usando el método de prueba error hasta que los valores obtenidos en el modelo se asemejen a los caudales reales.

La variación de los parámetros del SWAT se realizó según los criterios sugeridos en el manual de usuario del programa Neitsch *et al.* (1999) y en la tabla de análisis de sensibilidad de las variables utilizada por Zarate (2004).

Los parámetros modificados para ajustar la serie en la calibración fueron el Número de Curva en condición (CN), la capacidad disponible del suelo (AWC), y el factor de compensación del suelo (ESCO), por ser de mayor sensibilidad en la producción de caudal líquido en los meses de junio, julio y agosto (Zarate, 2004).

El proceso de calibración es un ensayo de prueba error que termina una vez que los valores seleccionados para las variables minimizan la función objetivo. Los valores estadísticos utilizados como función objetivo fueron el error medio absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación (R). Adicionalmente se

calculó la eficiencia del modelo (EF) para cada mes. Los valores obtenidos para cada mes de calibración se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro. 14 Principales variables de calibración y parámetros estadísticos en el moldeamiento con SWAT

GRUPO	PARÁMETROS	UNIDADES	VALORES DE DEFECTO	VALORES DE CALIBRACIÓN	CALIBRACIÓN
Sub	CN	–	79	70	WPAS
Gw	ALPHA_BF	D	0,048	0,001	URH
HRU	ESCO	–	1	0.95	URH
PERIODO					2002-2012
MAE (Error Medio Absoluto)					0,013
RMSE (Error Cuadrático Medio)					0,29
r (Coeficiente de Correlación)					0.98
Coeficiente de Nash					0.64

Fuente: Elaboración Propia (2013)

Mientras que los mejores valores que se lograron minimizar para la función objetivo son para la **MAE** 0,013, **RMSE** 0.29, coeficiente de correlación es de **r = 0.98** y coeficiente de Nash 0.64. Para la simulación mensual, en general, el flujo simulado se adapta muy bien con los valores observados. La eficiencia de Nash y el coeficiente de correlación son valores que demuestran un buen ajuste para el periodo de análisis, lo que demuestra la gran capacidad que tiene el modelo en predecir los valores promedios mensuales de caudal. En los resultados del análisis de sensibilidad se identificó que los tres parámetros analizados son los más sensibles.

Numero de curva (CN), se realiza el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. Se observaron curvas al representarse en gráficos la profundidad de precipitación y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa. Los valores de CN han sido tabulados con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra.

Factor Alfa para el flujo base (ALPHA_BF), este es el umbral de la profundidad del agua requerida que ocurra el flujo de retorno o aporte de aguas subterráneas al flujo del cauce principal, cuanto más alto sea este valor, los aportes de flujo base hacia la corriente son más restringidos, al contrario de si este valor es menor los aportes serán mayores.

Factor de compensación para la evaporación del suelo (ESCO), este parámetro permite al usuario modificar la profundidad del perfil del suelo a la cual la demanda de evaporación es permitida para satisfacer la demanda de evaporación del suelo en el efecto de la acción capilar; este parámetro varía entre (0.01 y 1); cuando este valor es reducido, “el modelo es capaz de extraer más de la demanda de evaporación de los niveles más bajos”. SWAT supone que el 50% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 10 mm del suelo y el 95% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 100 mm del suelo.

En la figura 18, se muestra el histograma que se obtuvo con la calibración de los parámetros ya mencionados.

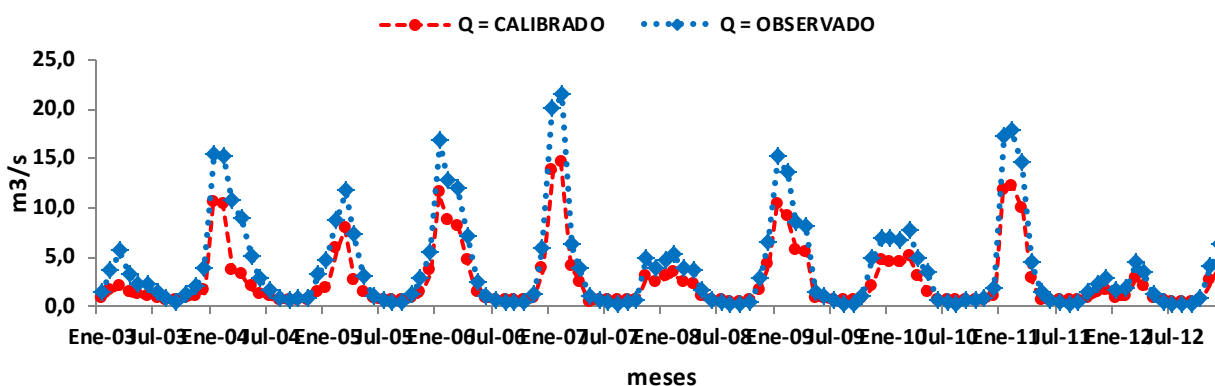


Figura 18. Hidrograma resultante de la calibración 2003-2012 con el modelo SWAT

Cuadro. 15 Datos de caudales (m³/s) de la calibración 2003-2012 con el modelo SWAT

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	0.7	1.4	2.0	1.2	1.0	0.9	0.7	0.5	0.4	0.6	0.9	1.4	11.8
2004	10.3	10.2	3.5	3.0	1.8	1.1	0.8	0.5	0.4	0.5	0.5	1.2	34.1
2005	1.7	5.7	7.8	2.5	1.2	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	1.2	3.5	26.0
2006	11.4	8.6	7.9	4.5	1.2	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.7	3.6	40.0
2007	13.6	14.5	3.9	2.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	3.0	2.3	42.0
2008	2.8	3.3	2.3	2.1	0.8	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	1.6	4.1	18.9
2009	10.3	9.0	5.6	5.3	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	1.8	4.4	39.3
2010	4.4	4.3	5.0	2.9	1.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.8	21.3
2011	11.6	12.0	9.8	2.7	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	1.2	1.5	41.6
2012	0.7	0.8	2.7	2.0	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	2.4	3.9	15.1
SUM	67.5	69.8	50.4	28.5	9.5	5.9	4.7	3.9	3.9	5.4	13.6	26.8	290.1
MED	6.8	7.0	5.0	2.9	1.0	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	1.4	2.7	29.0
MAX	13.6	14.5	9.8	5.3	1.8	1.1	0.8	0.5	0.4	0.7	3.0	4.4	42.0
MIN	0.7	0.8	2.0	1.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.8	11.8
DIAS	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	365.0

En el cuadro 15 podemos observar los resultados obtenidos por medio de los tres parámetros utilizados logrando así la calibración del programa para simular los caudales reales con los datos simulados.

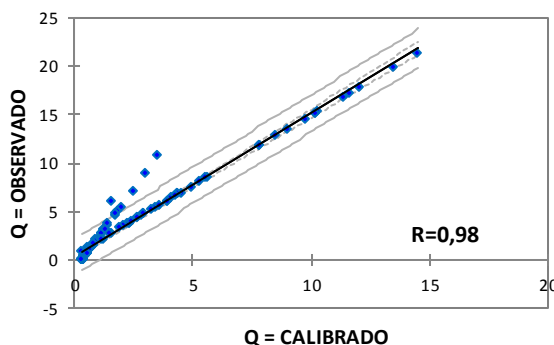


Figura 19. Grado de correlación entre series de caudal mensual observado y calibrado con el modelo SWAT.

En la figura 19, se muestra la correlación obtenida a nivel mensual los resultados de los índices obtenidos después de la calibración. El valor del coeficiente de correlación de Pearson a nivel mensual es de 0.98 reflejando un ajuste bueno entre valores observados y simulados.

4.1.6 Evaluación del Rio Keka para Fines Agrícolas

4.1.6.1 Balance Hídrico actualizado

El balance hídrico entre la oferta y demanda de agua para la cuenca del rio Keka con fines agrícolas, se ha realizado aplicando el software ABRO 02 v. 3.1, para lo cual los datos de ingreso son: datos climáticos (temperaturas media máxima y mínima, precipitación), cédula de cultivos, superficies de cultivos y caudales de la fuente de agua. Los datos que se exponen son la demanda de agua que requiere cada cultivo y la cantidad de agua que puede regarse óptimamente, todos estos datos expuestos se ha calculado para la situación actual y futura del proyecto, a continuación se detalla cada uno de estos factores:

4.1.6.2 Oferta mensual de agua con proyecto

El proyecto de riego en la cuenca del río Keka cuenta con fuente de agua principal, (Cuenca). Esta fuente de agua, ha sido aforada en diferentes periodos del año y estimado los volúmenes de aporte de agua. En el siguiente cuadro se presenta los volúmenes de agua mensual comprometidos para el proyecto, las que fueron obtenidas del análisis hidrológico ver anexo 2.

Cuadro 16. Volúmenes de agua disponible

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
V(m ³)	9,67	10,66	8,85	4,02	1,58	0,59	0,35	0,25	0,68	1,24	2,43	4,50
Q(l/s)	9669,35	10663,88	8850,99	4019,17	1576,80	587,07	350,68	246,25	675,74	1236,82	2434,21	4498,79
20%Q(l/s)	7735,48	8531,11	7080,79	3215,34	1261,44	469,66	280,55	197,00	540,59	989,46	1947,37	3599,03

Fuente: Elaboración Propia (2013)

Actualmente el agua captada de la vertiente no es utilizada para riego, solo para el consumo de animales bovinos y ovinos, no existe en la cuenca ninguna actividad minera o industrial que podría mermar la disponibilidad de agua para el proyecto o producir cambios cuantitativos o cualitativos.

Cuadro 17 Caudal aforado Cuenca Río Keka (SENAMHI)

Años	Calidad apariencia	Caudal l/s
2003-2012	Buena	1897,35

Fuente: Elaboración Propia (2013)

4.1.6.3 Eficiencias del sistema de riego Cuenca Río Keka

Para la situación con proyecto, se ha estimado los valores según las características de las obras propuestas, tanto en la zona de captación, conducción, distribución de agua en la zona y aplicación a nivel de las parcelas de cultivo. Los valores adoptados para el análisis del balance hídrico del proyecto se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 18. Eficiencias de riego en la situación sin y con proyecto

Eficiencias	Sistema de Riego	
	Cuenca Rio Keka	
	Sin Proyecto	Con Proyecto
En la captación	0.35	0.37
Conducción principal	0.80	0.86
Distribución	0.80	0.86
Eficiencia de aplicación	0.30	0.32
Eficiencia total (a*b*c*d)	0.067	0.087

Fuente: Estimaciones efectuadas en el área de riego

En las condiciones de mejoramiento, se prevé la conducción del agua por canales abiertos, asimismo para la aplicación del agua a nivel de parcela por tratarse de terrenos en pendiente moderada y ligera.

4.1.6.4 Demanda de agua

La cédula de cultivos proyectada, en lo esencial conserva las características de producción agrícola de la zona, toda vez que las familias campesinas cuentan con experiencias en el proceso de producción de los cultivos más importantes como la papa, haba, cebada, hortalizas y alfalfa.

La demanda de agua de cultivos en la situación con proyecto se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 19. Demanda de agua de los cultivos con proyecto

DEMANDA													
EFICIENCIA TOTAL = 0.087569	Eficiencia de Captación = 0.37			Eficiencia de Conducción = 0.86			Eficiencia de Distribución = 0.86			Eficiencia de Aplicación = 0.32			
Req. Bruto Total (mm)	730.83	0.00	405.37	445.98	571.49	665.99	522.67	716.63	536.79	649.47	825.44	573.46	6,644.11
DEMANDA TOTAL (l/s)	469.66	0.00	72.03	286.61	660.06	1,222.85	835.85	827.69	686.41	750.13	985.14	356.64	7,153.05
Caudal Unitario Bruto (l/s/ha)	2.82	0.00	1.51	1.72	2.13	2.57	1.95	2.68	2.22	2.42	3.18	2.14	25.35

Fuente: Elaboración Propia (2013)

4.1.6.5 Calendario agrícola

El calendario agrícola para la situación con proyecto, ha sido determinado por la fuente de JICA (1997), en base a las experiencias y prácticas en el manejo de los cultivos bajo a secano, tomando en cuenta principalmente el ciclo climático, disponibilidad de agua y los precios en los mercados, tal como se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 20. Calendario agrícola con proyecto

CULTIVO	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
papa				sss	sss				hhh	hhh		
haba		sss	sss	sss						hhh	hhh	
cebada				sss	sss					hhh	hhh	
hotalizas			sss	sss	sss	hhh	hhh	hhh				
alfalfa					sss	sss			hhh	hhh	hhh	

Fuente: JICA (1997).

sss: Siembra
 ppp: Plantación de plantin
 hhh: Cosecha

Tal como se puede observar en el calendario agrícola adoptada para la situación con proyecto, existen dos periodos de riego bien marcado, una para los cultivos de estiaje y otra los cultivos de verano que se beneficiarán con agua para riego complementario, disminuyendo de esta manera los riesgos climáticos, especialmente por sequía.

4.1.6.6 Requerimiento de Riego

Después de determinar la nueva cédula de cultivo a implementarse con el proyecto se procedió a realizar los cálculos de requerimiento de Riego para cada uno de los cultivos, para el cual es necesario realizar cálculos del balance hídrico relacionados con un equilibrio de ingreso de agua, tales como la lluvia y las fuentes de agua para Riego, frente a las pérdidas por evapotranspiración potencial y el requerimiento del cultivo.

A continuación se describe los procedimientos de cálculo de las diferentes variables del Balance Hídrico en base al software del ABRO 02 ver 3.1.

4.1.6.7 Evapotranspiración del Cultivo de Referencia

Para el cálculo de la evapotranspiración se ha aplicado el método de Penman - Monteith. En el caso específico, se ha utilizado los registros de temperaturas medias mínimas y máximas, siendo estimadas las demás variables por el programa diseñado para tal efecto. En lo que sigue se presenta los valores estimados para la evapotranspiración del cultivo de referencia.

Cuadro 21. Evapotranspiración según Penman – Monteith

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	ANUAL
	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	30	31	365
ET (mm/día)	2.73	2.74	3.09	3.40	3.80	3.95	3.73	3.51	3.46	3.36	3.07	3.05	
ET (mm/mes)	81.90	85.04	95.94	101.96	117.90	118.46	115.64	108.68	96.97	104.19	92.19	94.41	1,213.26

Fuente: Elaboración Propia (2013)

En el cuadro se observa que los mayores valores de evapotranspiración son durante los meses de octubre a diciembre, el valor de la evapotranspiración.

4.1.6.8 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se determinó a partir de la precipitación media mensual, a la que se aplicó la expresión correspondiente a las zonas de altiplano.

$$Pe = (pp - 15) * 0.70 \dots \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

- Pe = Precipitación efectiva en milímetros
- Pp = precipitación media mensual en milímetros
- 15 = Valor en mm correspondiente a pérdidas por intercepción superficial
- 0,70 = Porcentaje de lluvia que es aprovechada por la planta

En el siguiente cuadro se muestra la precipitación media mensual y la precipitación efectiva por mes, ordenada de acuerdo al estudio hidrológico.

Cuadro 22. Precipitación media y precipitación efectiva

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	ANUAL
	30	31	31	30	31	30	31	31	28	31	30	31	365
Prec. (mm)	8.00	6.50	11.80	23.00	31.20	43.00	72.90	99.70	89.80	58.30	21.90	15.40	481.30
Prec. Efec. (mm)	0.00	0.00	0.00	7.70	13.44	21.70	42.63	61.39	40.48	32.41	6.93	2.38	229.04

Fuente: Elaboración Propia (2012)

4.1.6.9 Determinación de Uso Consuntivo utilizando Coeficientes de cultivos Kc

Llamado también coeficiente de cultivo, es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se quiere evaluar su consumo de agua.

El coeficiente K_c de los cultivos, es un factor que relaciona la Evapotranspiración potencial y la actual o del cultivo. Por tanto, el valor K_c representa la Evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas y que produzcan rendimientos óptimos. Los factores que afectan los valores de K_c son principalmente: las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o Riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento.

El coeficiente K_c de cada cultivo, tendrá una variación estacional en función de las fases de desarrollo del cultivo, y que son las siguientes:

- a) Fase inicial: Fase I. Comprende el periodo de germinación y crecimiento inicial. Desde la siembra hasta el 10% de cobertura vegetal.
- b) Fase de desarrollo del cultivo: Fase II. Comprende, desde el final de la Fase I hasta, llegar a una cobertura del orden del 70 – 80%.
- c) Fase de maduración: Fase III. Comprende desde que se obtiene la cubierta sombreada efectiva completa hasta el momento de iniciarse la maduración que se hace evidente por la decoloración o caída de las hojas.
- d) Fase final del cultivo (Cosecha): Fase IV. Comprende desde el final de la Fase III hasta la plena maduración o cosecha.

Ante la falta de información específica para nuestro medio y en especial para el departamento de La Paz, se optó por utilizar los valores K_c procesados por el PRONAR basándose en los valores K_c estimados por la FAO (Manual Nro. 24), y la experiencia propia del PRONAR en la elaboración de proyectos de Riego.

Esto se debe a que las condiciones locales, difieren sustancialmente de las condiciones donde se han generado los coeficientes de cultivo. En general, la producción agrícola de la zona andina y sub andina se realiza en condiciones de permanente déficit hídrico y falta de nutrientes en los suelos. En estas condiciones, el ciclo vegetativo de los cultivos se retarda y no logran una cobertura completa del área cultivada.

Considerando las características de la información climática y de la cédula de cultivos, se estimaron los valores de los coeficientes de cultivos (Kc) de acuerdo a las condiciones particulares de la zona del proyecto, sobre la base de las experiencias del campo y valores determinados por la FAO y tabuladas en el software ABRO 3.1.

4.1.6.10 Calculo de la Evapotranspiración real (ETR)

Los datos de la evapotranspiración potencial más los coeficientes de los cultivos permiten determinar la evapotranspiración real (ETR) mediante la siguiente expresión:

$$ETR = Kc * ETo \quad \dots \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

- ETR = Evapotranspiración Real
- Kc = Coeficiente del cultivo
- ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia

Una vez efectuados los cálculos indicados, se obtuvieron los valores mensuales para todos los cultivos planteados en la cédula de cultivos y para los meses considerados determinándose los siguientes parámetros; la evapotranspiración real (ETR) total mensual de los cultivos, área total mensual cultivada, requerimientos totales netos por mes, requerimientos de Microriego por mes, caudales mensuales requeridos y caudales unitarios mensuales. Estos resultados se presentan en detalle en el anexo 1 en las planillas del ABRO para la situación sin y con proyecto.

4.1.6.11 Requerimiento de Riego

Mediante el cálculo de las variables arriba mencionadas, con la ayuda del software del Balance Hídrico (ABRO) se determinó el requerimiento de Riego con los valores de la precipitación efectiva y los valores de Evapotranspiración Real de acuerdo a la aplicación de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Re q.Riego &= Pe > ETP = 0 \\ Re q.Riego &= Pe < ETR = mm / ha \end{aligned} \dots \text{Ecuación (5)}$$

Donde:
PPefec = Precipitación efectiva calculada
ETR = Evapotranspiración real calculada

En el anexo 1, correspondiente al cálculo de las áreas bajo Riego óptimo como en el cuadro siguiente, se presentan los requerimientos de Riego calculados por mes en función a los cultivos propuestos.

Cuadro 23. Resumen de requerimiento de riego de los cultivos con proyecto

	Junio 30	Julio 31	Agosto 31	Septiembre 30	Octubre 31	Noviembre 30	Diciembre 31	Enero 31	Febrero 28	Marzo 31	Abril 30	Mayo 31	ANUAL 365
<i>ETR total (mm)</i>	129.40	0.00	35.50	107.05	231.08	408.32	334.19	338.90	254.05	272.98	245.23	127.45	
<i>Área Total (ha)</i>	186.57	0.00	47.59	166.57	309.35	475.92	428.33	309.35	309.35	309.35	309.35	186.57	
<i>Req. Neto (m3)</i>	106,602.44	0.00	16,893.96	65,053.09	154,812.45	277,558.86	196,042.98	194,129.92	145,412.19	175,937.82	223,605.39	83,648.09	1,639,697.20
<i>Req. Riego (mm)</i>	64.00	0.00	35.50	39.05	50.04	58.32	45.77	62.75	47.01	56.87	72.28	50.22	581.82
<i>Caudal Neto (l/s)</i>	41.13	0.00	6.31	25.10	57.80	107.08	73.19	72.48	60.11	65.69	86.27	31.23	
<i>Caudal (l/s/ha)</i>	0.25	0.00	0.13	0.15	0.19	0.23	0.17	0.23	0.19	0.21	0.28	0.19	2.22

Fuente: Elaboración Propia (2012)

4.1.6.12 Determinación del área de Riego incremental

La determinación del área incremental de Riego, se realizó utilizando el software del ABRO3.1, para fines de cuantificar la superficie regada óptimamente en la situación sin proyecto y en la situación con proyecto. El área Bajo Riego óptimo, como efecto directo de las acciones del proyecto, está dada por la diferencia entre las áreas bajo Riego óptimo con y sin proyecto, es decir: podemos decir que 155.77 hectárea serán regadas por el volumen 2987,32 l/s que es la cantidad que desemboca la cuenca del río Keka.

$$\text{Área Incremental} = \text{ABRO c/p} - \text{ABRO s/p}$$

$$\text{Área Incremental} = 475.92 - 320.15$$

$$\text{Área Incremental} = 155.77 \text{ hectárea}$$

5. CONCLUSIONES

- ✓ El uso de los modelos hidrológicos para el cálculo de caudales se convierte en una herramienta valiosa de planificación estratégica de interrelación en los aspectos sociales, culturales, económicos, políticos y ecológicos, los modelos hidrológicos proporcionan datos simulados de procesos hidrológicos lo cual nos ayuda para el uso de proyección al diseño y manejo de estructuras hidrológicamente relacionadas a la agricultura.
- ✓ El modelo hidrológico SWAT es un modelo continuo conformado a largo plazo, en cuanto es exigente a la información de entrada al modelo, como el clima, tiempo, propiedades del suelo topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar en los datos de entrada así también nos proporcionó datos de caudales de la cuenca del rio Keka, este programa también nos proporciona datos de sedimentos, nutrientes y pesticidas de la cuenca evaluada.
- ✓ El modelo mostró un ajuste del coeficiente de correlación satisfactorio para la cuenca Rio Keka, graficando los datos (observados y calibrados), se refleja una buena distribución aleatoria de los puntos, concluyéndose así que no se presentaron errores sistemáticos y que se presentó un buen ajuste.
- ✓ El uso del modelo hidrológico SWAT sin previa calibración y validación conduce a un sobre o subestimación considerable de las variables estudiadas., mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable de la dinámica y magnitud entre los datos observados y datos simulados. Por lo tanto, la verdadera capacidad predictiva del modelo es mayor a la de un modelo sin previa calibración, tal como lo muestra la etapa de validación. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, los resultados muestran la conveniencia de ser calibrados y validados con el mayor número de datos confiables de escurrimiento.
- ✓ Conociendo los volúmenes de agua de la cuenca se determinó el balance hídrico entre la oferta y demanda de la Cuenca del Rio Keka aplicando el software ABRO 02 v.3.1, la demanda de agua que requiere cada cultivo y la cantidad de agua que puede regarse óptimamente solo satisface un 25.24% de total del Área Cultivable

en la Cuenca, esta cantidad de agua no satisface la necesidad de riego para toda la cuenca del río Keka.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Que se puede complementar las demás evaluaciones en la cuenca las cuales son: sedimentos, nutrientes y nivel de contaminación de pesticidas de la cuenca evaluada para el mejor manejo de la cuenca.
- ✓ La simulación en el modelo **SWAT** a pesar de tener mejores resultados, está condicionado a ciertos parámetros propios de la base de datos del **SOFTWARE**, es necesario revisar más a profundidad el efecto que estos valores pueden producir sobre la simulación de los caudales.
- ✓ La integración del sistema SWAT - ARCGIS 9.3 ha probado ser un modelo hidrológico y de calidad del agua, efectivo para coleccionar, manipular, visualizar y analizar la entrada y salida de datos, por lo que se recomienda su uso en las cuencas de la ciudad de La Paz.
- ✓ Recomendamos la actualización de los datos de suelo en cuanto al análisis físico y químico, para el mejor manejo de información por ser los datos de suelos ya ase años atras.
- ✓ Recomendamos la implementación de manuales de usuario ya que el manual del programa SWAT solo se encuentra en el idioma de ingles, se recomienda sacar manuales en español para su mejor manejo de este programa, y para la utilización de los estudiantes de la carrera.
- ✓ Se propone que el desarrollo de la modelización distribuida se apoye más en la aplicación de modelos que en el desarrollo de nuevas teorías. El incremento de la capacidad de cálculo permite construir sistemas para almacenar y reprocesar los resultados de simulaciones pasadas y compararlas con la situación actual. Esto permite aprender las particularidades de una zona y sus respuestas hidrológicas cada vez con mayor nivel de detalle.
- ✓ La reevaluación de un modelo permitirá saber dónde ha fallado, y cuantificar las incertidumbres de las predicciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

AMURRIO, FIDEL 2003. Principios básicos de la ingeniería de Riego y Drenaje y su Aplicación. UMSS - Facultad de Ciencias Agrícolas, Forestales y Veterinaria. Cochabamba - Bolivia.

ABRO, 2002, Manual de uso, Vice ministerio de Desarrollo Rural Riego, Dirección general de Riego. La Paz – Bolivia.

AUZA, M., 2007. Apuntes del modulo: MODELAMIENTO HIDROLÓGICO. Curso de Maestría en evaluación de Recursos Hídricos. Cochabamba: 25p.

BERRY J.K. y TOMLIN C.D. 1981. Construcción de Modelos Cartográficos: Análisis de Mapas con la Ayuda de Computadoras. Taller de Entrenamiento en Sistemas de Información Geográficos. San José, Costa Rica.

BOSQUE, J., ESCOBAR, F., GARCIA, E., SALADO, MJ., 1994. Sistemas de Información Geográfica: prácticas con PC ARC/INFO e IDRISI. Edición RA – MA. Editorial, Madrid, España.

CHILON, E. 1997. Manual de Edafología, práctica de campo y laboratorio. La Paz Bolivia, Editado en la facultad de Agronomía UMSA. p.139 -173.

CHIPANA, 2003, Principios de Riego y Drenaje. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz-Bolivia.

CHOW, V; MAIDMENT, D; MAYS, L. 1994. Hidrología Aplicada. Bogotá, Colombia. Marta distribuido ANSWERS: Aplicación en la cuenca del Río Pejibaye, Cartago, Costa Edna Suárez, 584 p.

ESCOBAR J., BOSQUE J., GRACIA E., Y SALADO MJ., 1994. Sistemas de Información Geográfica.

FARIAS, R. 2005. Apuntes de hidrología. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniera. 82 p.

GAVILANES, C 2004, Construcción de escenarios para una propuesta de Re delimitación de la Reserva Ecológica El Ángel usando como herramienta un Sistema

de Información Geográfica. Trabajo de titulación (Ingeniero Geográfica y de Medio Ambiente). Sangolqui, Ecuador: ESPE, Facultad de Ingeniería Geográfica, p 77.

HERNÁNDEZ, A. 2003. Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del deL Río Guacerinque, Tegucigalpa, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba CR. CATIE.112 p.

MAIDMENDT, DR. 1993. GIS and hydrological modeling. In Goodchild, MF; Parks, BO; Steayert, LT. Eds. Environmental modeling with GIS. New York, US, Oxford University press. P 147-167.

MALDONADO, A. 1990. Desarrollo de simulación de crecidas en la cuenca del rio Paracti. Proyecto de grado. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería. 3p.

MONTES DE OCA 1995. Geografía y Clima de Bolivia. La Paz – Bolivia, Academia de Ciencias. Boletin publicado por Bull. Inst. fr. études andines. p. 357 – 368.

NARRO, E. 1994. Física de suelos, con enfoque agrícola. México DF., Ed. Rotodiseño y color S.A. p. 33 – 58.

NEITSCH, S.L.,ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., 1999b, Soil and Water Assessment Tool User's Manual, USDA, Agriculture Research Service, Temple, TX 76502. 1999, p. 200

NEITSCH, S. 2000. Soil and Water Assessment Tool: User Manual 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory o Agricultural Research Service. 781p.

NEITSCH S.L., J.G. ARNOLD, J.R. KINIRY, J.R. WILLIAMS, K.W., (2002) “SWAT2000 (Soil and water Assessment Tool) theoretical documentation version 2000”.

OSORIO, A., MESA, F., SALINAS, R., 1994. Como medir el Agua de Riego. Centro Regional, de investigación INTIHUASI del Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

PARRA, J., 2007. Aplicación del Modelo SWAT2000 Para la Determinación de Caudales Mensuales. Universidad Mayor de San Simón, Laboratorio de Hidrología LH-UMSS. Cochabamba, 48 p.

PARRA, U., J. Y MONTENEGRO, E., Y FIENGO, F., 2007. Comparación de metodologías para calcular los escurrimientos mensuales de una cuenca semiárida. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón CLAS-LH., 72 p.

PISANI, B., SAMPER., F, (2008), “Acoplamiento de Modelos Hidrológicos Semidistribuidos y Sistemas de Información Geográfica”, Universidad de Coruña, Departamento de Tecnología de la Construcción de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 81-88 pp

PORTA, J. LOPEZ-ACEVEDO, M. ROQUERO, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid España, Ed. Mundi Prensa. 789 p.

PRONAR, 2003.. “Plan de Riego Bolivia 2002 - 2007”. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural; Vice ministerio de Desarrollo Rural y Riego y Programa Nacional de Riego. Bolivia.

PRONAR, 1998. “Plan de Riego Bolivia”. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios; Vice ministerio de Desarrollo Rural y Riego y Programa Nacional de Riego. Bolivia.

PORTILLA, R., 1994. Simulación hidrológica y de erosión de suelos utilizando el modelo distribuido ANSWERS: Aplicación en la cuenca del Río Pejibaye, Cartago, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba CR. CATIE. 172 p.

REFSGAARD, J., STORM., B, SINGH., V, (1995). MIKE-SHE. En: Singh VP (Ed.). Computer-Models of Watershed Hydrology. Water Res. Publications. Littleton, Colorado. 809-846 pp.

RÍO GUACERINQUE, Tegucigalpa, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba CR. CATIE. 112 p.

ROLDAN, J., 2007. Técnicas de Aforo en Sistemas Hidráulicos. La Paz–Bolivia. p 12.

RUIZ, H., 2010. Manejo Integrado de cuencas Hidrográficas, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de agronomía. La Paz. 25 p.

RUIZ, J., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos (modelo SIMPA). Tesis Doctoral. Serie de monografías del CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid. 180 p.

SANTANA, L., 2000. Determinación de la capacidad de uso y aptitud de la tierra: un proceso mas que necesario en el ordenamiento territorial, In congreso colombiano de geografía. Cali Colombia, 2000. Consultado el 7 de diciembre del 2004. Disponible en línea: <http://www.azimuth.univalle.edu.co/capsue.htm>.

SINGH, V.P., 1995. Computer models in Watershed Hydrology. Water Resources publications, Littleton, CO.

VALERA, C., 1602. La Santa Biblia, (Eclesiastés 1.7).

VILLÓN, M., 2002. Hidrología. San José, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 435p.

TORRES, E; FERNÁNDEZ, D, OROPEZA, J, SAENZ, E. 2003. Aplicación del Modelo Matemático de simulación hidrológica SWAT en la Cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, estado de University press. P 147-167.

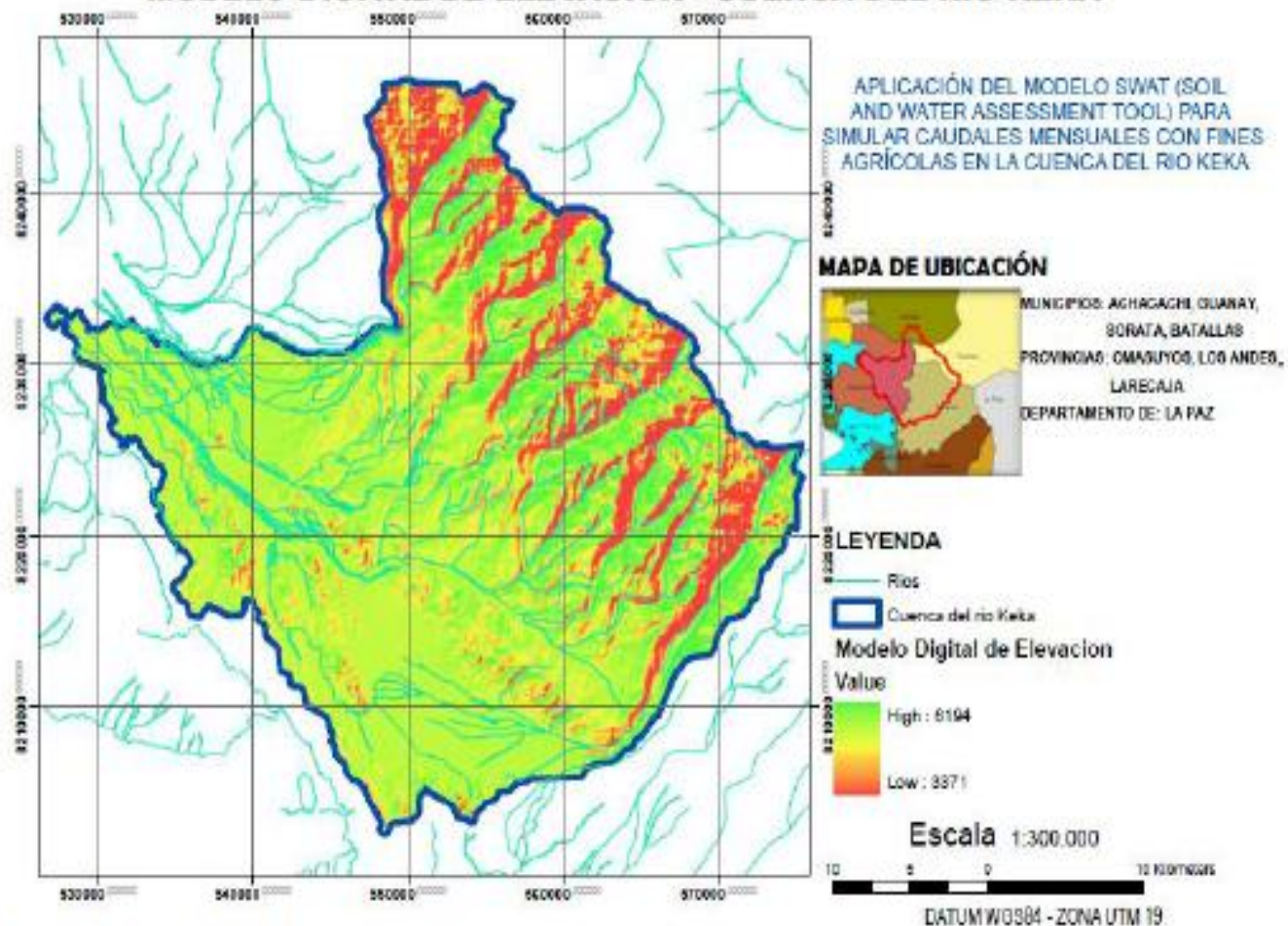
URIBE, N., 2010. Conceptos básicos guía rápida para el usuario “Versión SWAT 2005” 3p.

ZARATE., O, MONTENEGRO., E, (1999), “Impacto del manejo integral de cuencas en el balance hídrico 1993-1998”, serie de estudios hidrológicos LHUMSS-PROMIC.

ZONISIG. 2001. Metodología para el cálculo del balance hídrico del suelo. Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente. Subsecretaria de ordenamiento territorial. La Paz – Bolivia.

ANEXOS

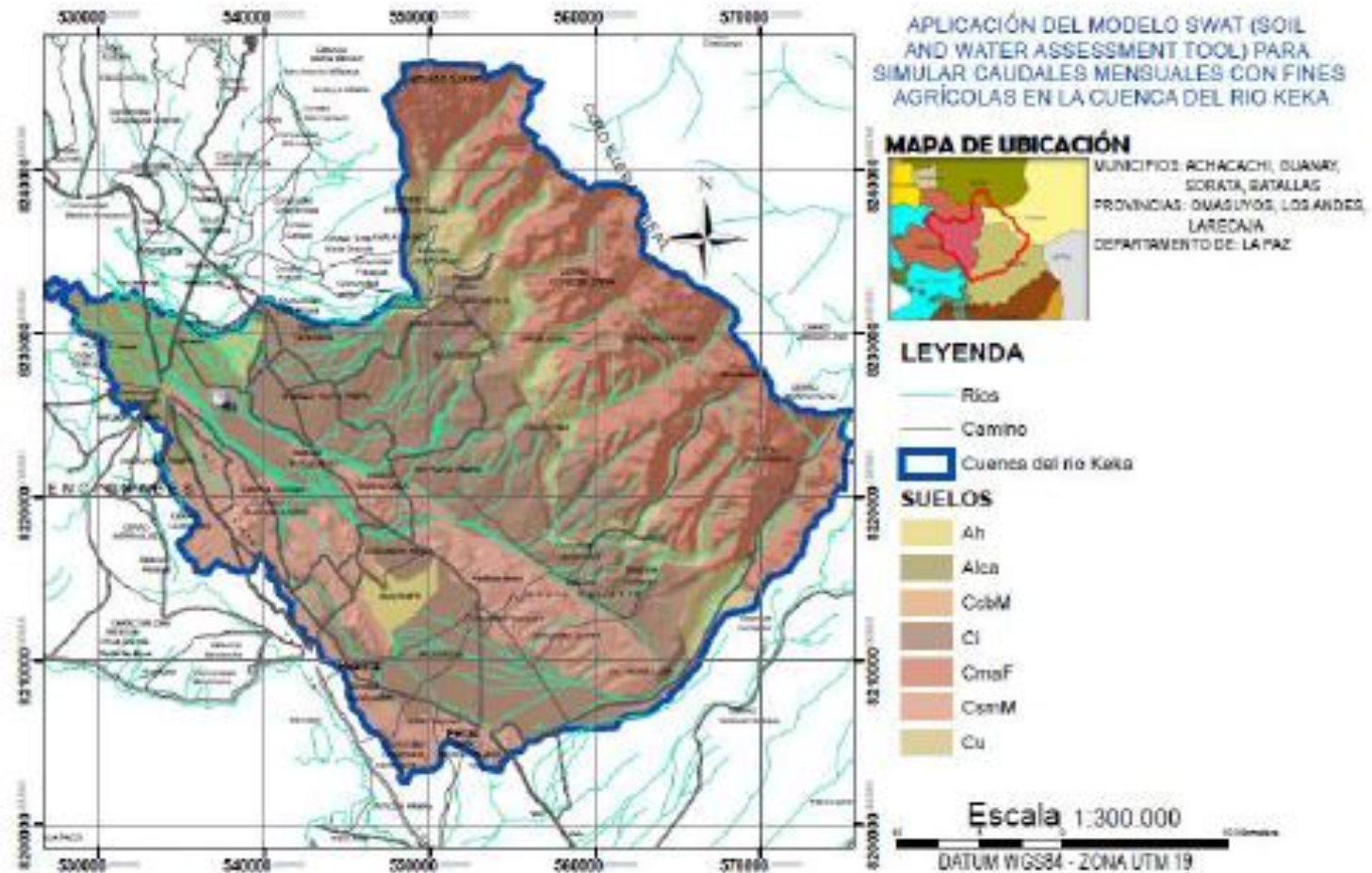
MODELO DIGITAL DE ELEVACION - CUENCA DEL RIO KEKA



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y agua. Elaboración Propia (2013)

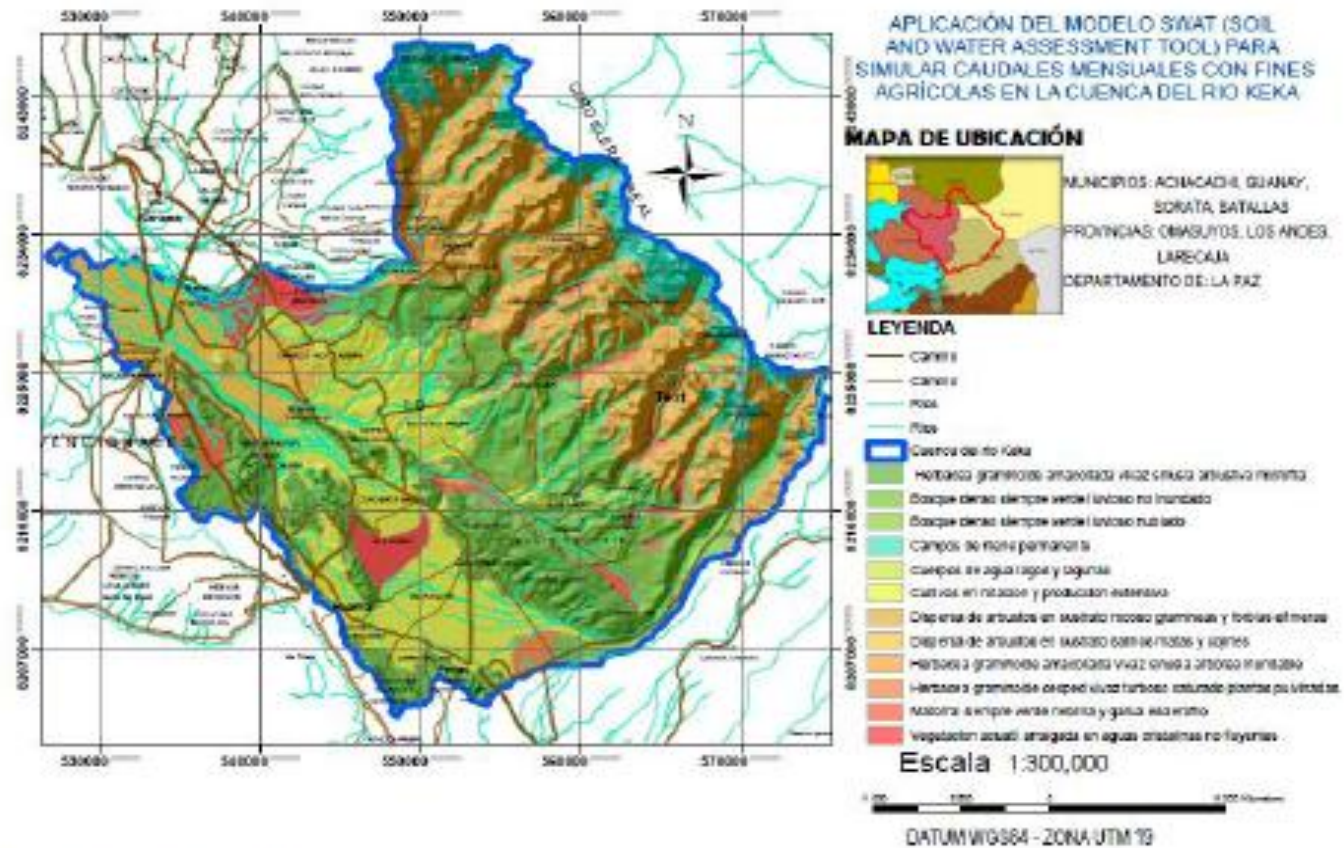
Mapa 2. Modelo Digital de Elevación (MED) – Cuenca del río Keka.

MAPA DE SUELOS - CUENCA DEL RIO KEKA



Fuente: MIC - Achacachi. Elaboración Propia (2013)
 Mapa 3. Cobertura Vegetal - Cuenca del Río Keka

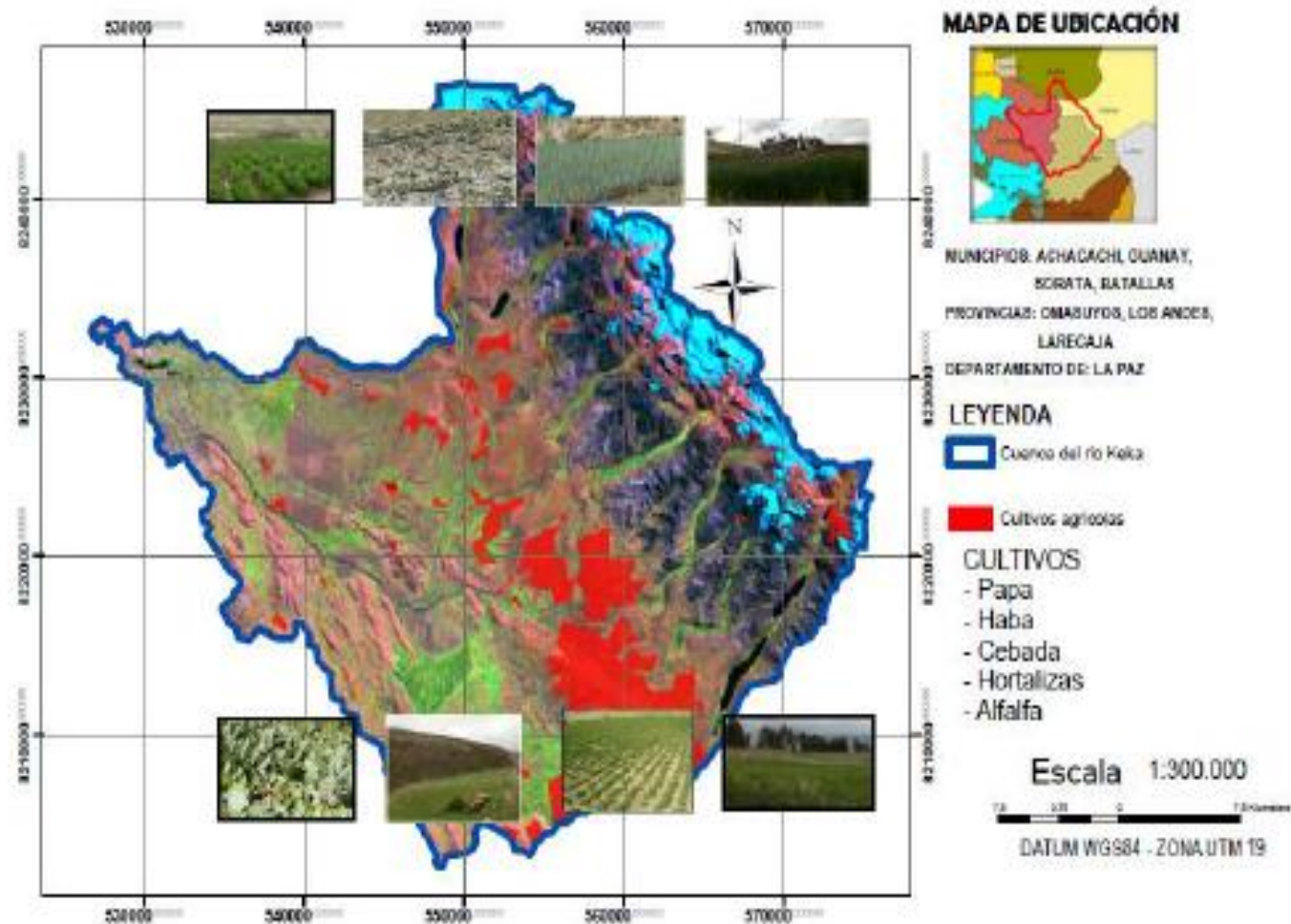
MAPA DE COBERTURA - CUENCA DEL RIO KEKA



Fuente: MIC-Achacachi Elaboración Propia (2013)

Mapa 4. Mapa de Suelos – Cuenca del río Keka.

CULTIVOS EN LA CUENCA DEL RIO KEKA



Fuente: Elaboración Propia (2013)

Mapa 5. Cultivos Agrícolas – Cuenca del Río Keka.